ELEMENTI

DI

FISICA

per Licei ed Istituti Tecnici

DEI DOTTORI

FELICE MARCO
già Professore di Fisica e Chimica
nel R. Liceo Cavour di Torino

CARLO CATTANEO
Prof. di Fisica gener. ed applicata
nel R. Istituto Tecnico di Torino

VOLUME I.

Meccanica Generale - Meccanica dei Liquidi
Meccanica dei Gas - Acustica.

Con 194 figure intercalate nel testo

TERZA EDIZIONE

1906
DITTA G. B. PARAVIA E COMP.
(Figli di I. VIGLIARDI-PARAVIA)
TORINO-ROMA-MILANO-FIRENZE-NAPOLI

PROPRIETÀ LETTERARIA

Torino — Stamperia Reale G. B. Paravia e Comp.
1991 (M3) XI-905.

PREFAZIONE ALLA PRIMA EDIZIONE

Da tempo ero persuaso della convenienza di ridurre notevolmente il mio *Trattato di Fisica* per Licei ed Istituti Tecnici, sia per le riduzioni avvenute nei programmi, sia perchè oggidì si richiede dappertutto economia del tempo, dello spazio, del lavoro e della spesa. Con tale concetto mi decisi a compilare la 4ª edizione di queste *Nozioni di Fisica*. Ma temendo, per una parte, che l'amore che ciascuno sente per le sue produzioni mi impedisse di fare tutte le amputazioni necessarie per quella riduzione, e per l'altra, che con 40 anni di insegnamento sulle spalle fossi troppo vecchio per infondere alla nuova edizione un soffio di vita giovanile, pensai di associarmi nel nuovo lavoro un insegnante più giovane di me, che trovai nella persona del Dottore Carlo Cattaneo, professore di Fisica generale ed applicata nel R. Istituto Tecnico di Torino.

La presente 4ª edizione in due volumi è pertanto l'opera di ambidue.

L'insegnamento della Fisica generale nei Licei e negli Istituti Tecnici non ha per scopo di formare dei fisici, ma solo di somministrare le cognizioni più generali ed elementari intorno a questa disciplina così feconda di utili applicazioni

alla vita comune. Perciò dallo studio elementare della Fisica si debbono escludere i metodi di ricerca che solo si possono ben intendere mettendoli in pratica nei laboratorii.

Siccome poi i programmi sono quasi identici per i Licei e per gli Istituti Tecnici (nella parte comune a tutte le sezioni di questi), perciò si comprende come il libro possa servire per gli uni e per gli altri.

Con tali concetti venne redatta la presente nuova edizione, che spero potrà servire meglio delle precedenti a far conoscere alla gioventù italiana i rudimenti della più importante e fondamentale fra le scienze che hanno per oggetto lo studio della *Natura*, nostra madre e maestra.

Torino, marzo 1899.

Prof. Felice Marco.

PREFAZIONE ALLA TERZA EDIZIONE

In questa terza edizione del 1° Volume venne soltanto introdotta qualche variazione e vennero eliminate alcune piccole sviste.

Torino, Ottobre 1905.

Gli Autori.

Capitolo I.

NOZIONI PRELIMINARI

§ 1. Corpi, Materia, Fenomeni, Osservazioni ed Esperimenti.

1. Corpi e materia. — Nelle scienze naturali chiamansi *corpi* tutti gli oggetti che fanno impressione sui nostri sensi, come il sole, la luna, le stelle, gli animali, le piante, le pietre, i libri, le penne, ecc.

La sostanza costituente i corpi denominasi *materia*, e il complesso dei corpi esistenti nell'universo chiamasi *natura*.

2. Fenomeni — I corpi presentano sovente dei cangiamenti nel loro modo di essere. Per esempio: Un corpo non sostenuto cade, cioè cangia luogo nello spazio, movendosi verso la terra: l'acqua per raffreddamento si riduce in ghiaccio, ed inversamente per riscaldamento si riduce in vapore; un pezzo di legno riscaldato si accende e brucia, ecc.

Ogni cangiamento che avviene nel modo di essere dei corpi chiamasi *fenomeno*.

3. Fenomeni fisici e chimici. — Quando i corpi cadono cangiano luogo nello spazio, ma la loro materia è sempre la stessa. Parimente, i corpi riscaldati fondono, e poi col raffreddamento ritornano nello stato primiero. Un pezzo di ceralacca, o di vetro, strofinato con lana, cuoio, ecc., acquista la proprietà di attrarre corpi leggieri, siccome ritagli di carta, paglia, ecc., ma la sua materia è sempre la stessa.

Questi fenomeni, nei quali non avviene cangiamento nella composizione della materia, si dicono *fenomeni fisici*, e il loro studio costituisce l'oggetto della scienza denominata *Fisica*.

Con tal nome si comprese dapprima tutta la scienza della natura. Ma a misura che essa si estese venne divisa e suddivisa in più rami, per modochè la *Fisica moderna* si può definire: *la scienza che studia le forme più generali dell'attività della materia, le quali si manifestano nei fenomeni in cui non è mutata la composizione della medesima.*

Invece, quando si strofina un fiammifero di cera, si accende e brucia dapprima il fosforo di cui è guernito, e poi la cera, ed ambidue si uniscono ad un altro corpo che si trova nell'aria, denominato *ossigeno*; il qual fenomeno si dice *combustione*.

Parimente il ferro in contatto coll'aria umida piglia la *ruggine*, nella quale la materia del ferro si è unita con quella dell'acqua.

Il mosto, che è di sapore dolce perchè contiene lo zucchero dell'uva, fermentando perde quel sapore e diviene spiritoso, perchè lo zucchero si converte in alcool, o spirito di vino, e in gas carbonico che si svolge nell'aria.

Le sostanze organiche, cioè gli animali e le piante, quando sono morte, in contatto dell'aria si trasformano emettendo gas fetenti.

Tali fenomeni i quali consistono in un cangiamento nella composizione della materia dei corpi si dicono *chimici*, e il loro studio costituisce l'oggetto di un'altra scienza denominata *Chimica*, la quale perciò si può definire: *la scienza che studia quelle forme dell'attività della materia le quali si manifestano nei fenomeni in cui è mutata la composizione della medesima.*

4. Osservazioni ed esperimenti. — Quando si nota un fatto o fenomeno che la natura ci presenta spontaneamente, come pes es. l'irrugginirsi del ferro nell'aria umida, si fa una osservazione. Invece se si promuove con qualche artifizio la manifestazione di un fenomeno, per es. l'attrazione del vetro e della ceralacca sui corpi leggieri quando sono strofinati, allora si fa un esperimento.

La Fisica e la Chimica procedono mediante osservazioni, esperimenti e ragionamenti.

§ 2. L'Estensione e l'Impenetrabilità.

1. Proprietà generali dei corpi. — I corpi ci presentano diversi modi di essere comuni a tutti che si dicono *proprietà generali dei corpi*. Quelle che importa conoscere dapprima sono: l'*estensione*, l'*impenetrabilità*, la *divisibilità*, la *comprimibilità*, la *dilatabilità*, la *porosità*.

In questo paragrafo si tratta delle due prime.

2. Estensione. — Osservando i corpi noi vediamo dapprima che ciascuno di essi occupa una certa porzione dello spazio. Tale proprietà chiamasi *estensione* e la porzione dello spazio occupata da ciascun corpo dicesi *volume*.

Nell'estensione si distinguono tre direzioni, denominate *lunghezza*, *larghezza* e *profondità* od *altezza*.

3. Impenetrabilità. — Tutti sanno che il luogo occupato da una persona non può essere occupato contemporaneamente da un'altra. Così pure un chiodo non può essere confitto nel legno, o nel muro, senza spostarne la materia. Una pietruzza non può cadere nell'acqua contenuta in un recipiente senza che il livello di essa si elevi.

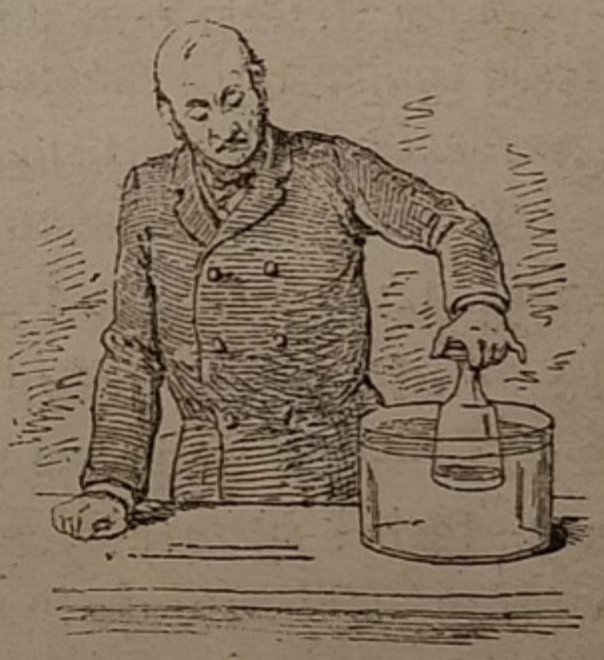


Fig. 1.

Capovolgendo un bicchiere nell'acqua (fig. 1), questa non entra nel medesimo, perchè ne è impedita dalla presenza dell'aria. Ma se si inclina il bicchiere in modo che l'aria ne possa uscire, allora l'acqua vi può entrare e riempierlo.

Se poi si mette sull'acqua un galleggiante di sughero, e su questo un pezzetto di candela accesa, capovolgendovi sopra un grande bicchiere, lo si può affondare nell'acqua senza che la fiamma si spenga subito. Essa si spegne bensì dopo un tempo più o meno lungo, secondo la capacità del bicchiere, perchè la fiamma consuma l'ossigeno dell'aria, senza del quale essa non può mantenersi.

Su tale fatto era fondata l'antica campana dei *palombari*, mediante la quale gli operai discendevano nell'acqua, entro una grande campana di lastra metallica. Oggidì invece usano un abito di caucciù, detto *scafandro*, munito di occhiaie per vedere.

Quando si versa acqua o vino in una bottiglia mediante un *imbuto* (fig. 2), succede talvolta che il liquido non scende perchè l'aria contenuta nella bottiglia non può uscire, e perchè scenda conviene spostare alquanto l'imbuto affinchè l'aria esca d'intorno al medesimo.

Fig. 2.

Le precedenti osservazioni ed esperienze provano che il *luogo occupato da un corpo non può essere contemporaneamente occupato da un altro*; questa proprietà della materia si denomina *impenetrabilità* o *incompenetrabilità*.

Tale parola viene pertanto usata dai fisici non precisamente nel suo senso letterale, perchè i corpi possono penetrare gli uni negli altri, ma nel senso che corpi diversi non possono esistere contemporaneamente nello stesso luogo dello spazio; perciò alcuni distinguono tale proprietà col vocabolo *incompenetrabilità*.

4. Proprietà essenziali dei corpi. — Le indicate due proprietà dei corpi, cioè l'estensione e l'impenetrabilità, si dicono *essenziali*, perchè senza di esse non si può concepire un corpo. Perciò mediante questi due caratteri essenziali si definisce anche la materia: *tutto ciò che è esteso ed impenetrabile*; e i corpi: *porzioni limitate di materia*.

§ 3. La Divisibilità, gli Atomi, le Molecole e l'Etere.

1. Divisibilità. — Tutti i corpi si lasciano dividere in particelle tanto più piccole quanto più fini sono i mezzi di divisione che si adoperano. Tale proprietà si dice *divisibilità*.

Per es. i corpi duri e fragili, come i cereali, lo zucchero, il caffè, il sale da cucina, ecc., si riducono in polvere più o meno fina mediante la macina o il pestello. L'acqua che cade sulle roccie si riduce in minutissime goccie come quelle costituenti la nebbia.

Se si mette un granello di fucsina (materia colorante che si ricava dal catrame) in un poco di alcool in cui si scioglie facilmente, e poi si versa la mescolanza in un grande recipiente d'acqua, si vede questa acquistare un bel colore violaceo. Ciò dimostra che quella materia colorante è suscettibile di dividersi in un grandissimo numero di piccolissime particelle, le quali comunicano il loro colore all'acqua.

Altri esempi dell'estrema divisibilità della materia ci vengono somministrati dalle materie odorose, come per esempio il muschio, sostanza odorosa che si trova in un ruminante della China, del Tibet e della Tartaria, denominato appunto *muschio*. Ora pochi granelli di questa materia odorosa possono profumare per molti anni l'atmosfera di un appartamento senza manifestare una sensibile diminuzione di peso alle più perfette bilancie. Il che significa che le particelle odorose che continuamente si sono staccate dal muschio, e profumarono l'aria col loro odore caratteristico, sono di una piccolezza superlativa, perchè tutte insieme non pesano $^1/_{10}$ di milligramma.

2. Atomi. — Dal fatto che tutti i corpi si lasciano ridurre in particelle tanto più piccole quanto più potenti sono i mezzi di divisione che si adoperano, si deve concludere che la materia non è continua, ma composta di particelle. Quindi si presenta la domanda: se la divisibilità della materia abbia un limite, o no. Ora, sebbene non si possa immaginare una particella di materia che non sia divisibile in altre due, tuttavia per interpretare i fenomeni fisici e chimici conviene ammettere che vi è un limite alla divisibilità della materia, cioè che questa è composta di particelle le quali non si possono più dividere senza distruggerla.

Quindi si ammette la materia costituita da particelle indivisibili, cui si dà il nome di *atomi*, parola che deriva dal greco e significa appunto *non divisibile*.

3. Molecole. — Nella chimica si distinguono i corpi in *composti* e *semplici*, secondochè nei medesimi si possono separare due o più qualità di materia, o no. Per es. l'acqua è un corpo composto, perchè dalla medesima si possono separare due qualità di materia che si dicono: *idrogeno* e *ossigeno*.

Così pure sono corpi composti: i legni, le pietre, ecc.; invece

sono corpi semplici: i metalli, eccettuate le leghe (ottone, bronzo, pakfong, ecc.), lo zolfo, il carbone ecc.

Quindi i corpi semplici si debbono ammettere costituiti da atomi *omogenei*. cioè della stessa natura, ed i corpi composti si debbono ammettere costituiti da atomi *eterogenei*, cioè di natura diversa.

Ora se l'acqua è un corpo composto di *idrogeno* e di *ossigeno* consegue che ogni sua particella si deve ammettere costituita da un certo numero di atomi di idrogeno uniti ad un certo numero di atomi di ossigeno, cioè che gli atomi dei corpi composti non sono isolati, ma riuniti in gruppi.

Un gruppo, o riunione di più atomi, si dice *molecola* (parola che viene dal latino *moles* e significa piccola mole).

Anzi, i fenomeni chimici inducono ad ammettere che non solo nei corpi composti, ma anche nella maggior parte dei corpi semplici, gli atomi non sono isolati, ma riuniti in gruppi o molecole. Perciò nei corpi semplici le molecole si debbono ammettere costituite da atomi omogenei, e quelle dei corpi composti da atomi eterogeni.

4. Dimensioni e differenze delle molecole. — Le molecole sono di una piccolezza superlativa e non si possono vedere neppure coi più potenti microscopi. Secondo Guglielmo Thomson, scienziato inglese, la grossezza o spessore delle molecole non deve essere superiore a $\frac{1}{100\ 000\ 000}$ di millimetro. E gli atomi debbono essere ancora più piccoli.

Le molecole possono differire fra loro, sia pel numero, sia per la qualità, sia per la disposizione ed i movimenti degli atomi.

5. Etere. — Infine i fenomeni fisico-chimici conducono ancora ad ammettere che: *esiste in tutto l'universo, tanto negli spazi interstellari, quanto negli spazi intermolecolari, una sostanza costituita da particelle tenuissime, cui si dà il nome di* etere.

Tale ipotesi che, come vedremo, permette di interpretare molti fenomeni fisici può essere fin d'ora stabilita sulle seguenti considerazioni.

Tutti i soli, cioè tutte le stelle dette fisse, irradiano continuamente luce e calore, i quali non possono essere che materia

o moto; se sono costituiti da materia, questa deve da lungo tempo avere occupato gli intervalli esistenti fra i corpi celesti; se sono costituiti dal moto, deve esservi un mezzo nel quale si propaghi il moto che parte da quei corpi luminosi e questo mezzo deve esistere dappertutto.

§ 4. I tre stati di aggregazione dei corpi.

1. **Corpi solidi.** — Osservando i corpi noi vediamo che alcuni, come il ferro, le pietre, ecc., *hanno le molecole stabilmente congiunte, per modo che non si possono separare senza uno sforzo più o meno grande. Perciò essi posseggono e conservano forma propria, ricevuta dalla natura o dall'arte.* Tali corpi si dicono *solidi.*

2. **Corpi liquidi.** — Altri corpi, invece, come l'acqua, l'olio, il mercurio, *hanno le molecole debolmente congiunte, per modo che possono facilmente scorrere le une sulle altre. Perciò questi corpi non hanno forma propria, ma pigliano quella dei recipienti che li contengono.* Essi diconsi *liquidi.*

3. **Corpi gazosi.** — Infine esistono corpi, siccome il vapore acqueo che esce dalla caldaia di una macchina a vapore, l'aria che costituisce l'atmosfera che ci circonda, i quali *hanno una tendenza ad espandersi, od aumentare di volume*, perchè le loro molecole tendono ad allontanarsi. Tali corpi diconsi *aeriformi* o *gazosi.*

Essi si differenziano dai liquidi perchè, mentre questi occupano solo la parte inferiore dei recipienti che li contengono, i corpi gazosi invece tendono sempre ad occupare tutta la capacità dei medesimi, siccome si vede nell'aria mista a fumo quando si spande nelle camere, oppure riscaldando un poco di iodo in un pallone che si riempie di un vapore violaceo.

4. — I detti tre stati dei corpi si dicono **stati di aggregazione.**

5. — I gaz e i liquidi, le cui molecole scorrono facilmente le une sulle altre, ricevettero anche il nome comune di **fluidi.**

§ 5. La Compressibilità.

I corpi possono essere ridotti a minore volume sotto l'azione di pressioni esterne. Questa proprietà si dice *compressibilità.*

I corpi più compressibili sono i gas, i quali diminuiscono di volume presso a poco in proporzione della pressione.

Così nello schioppetto (fig. 3) dei ragazzi quanto più si comprime l'aria fra le due pallottole di stoppa, tanto più essa diminuisce di volume, ma nello stesso tempo aumenta la pressione delle sue molecole finchè la seconda pallottola salta fuori dalla canna, spinta dall'aria compressa dalla prima.

Fig. 3.

I liquidi sono pochissimo compressibili, e i solidi lo sono in diverso grado. I più compressibili sono le stoffe, la carta, il cuoio.

L'impronta che ricevono i metalli nella fabbricazione delle monete e medaglie dimostra che anch'essi sono compressibili.

Infine, perfino i corpi duri, come il vetro, il marmo, l'acciaio, l'avorio, si lasciano comprimere. Infatti lasciando cadere una palla di marmo o di avorio, su un piano di marmo o altra pietra, tinto in nero con un poco di olio e carbone, o anche con inchiostro, rimane sulla palla una macchia circolare, più o meno larga secondo l'altezza della caduta, la quale macchia prova che la palla nell'urto si è schiacciata.

§ 6. La Coesione e l'Adesione.

1. Attrazione e repulsione molecolare — Poichè le molecole dei corpi solidi sono stabilmente fra loro congiunte, si deve ammettere una causa che produce tale effetto ; questa causa chiamasi *attrazione molecolare* ed è massima nei solidi.

Invece la causa che tende ad allontanare le molecole dei gas di dice *repulsione molecolare.*

Rispetto a queste due azioni i liquidi si trovano in uno stato intermedio fra i solidi e gli aeriformi.

2. **Coesione e adesione.** — L'attrazione molecolare si distingue in *coesione* ed *adesione* secondo i diversi effetti che produce.

Chiamasi *coesione* l'*attrazione che tiene riunite le molecole di un medesimo corpo*, per es. del legno, delle pietre, dei metalli.

Chiamasi *adesione* l'*attrazione che unisce le molecole dei due corpi posti a contatto* ; per es. quelle del cemento alle pietre, del gesso alla lavagna, dell' inchiostro alla penna ed alla carta, ecc.

Si fa uso dell'adesione nell'attaccare con pasta, gomma, colla ; nel dare le tinte, le vernici ; nella pittura, nell'argentatura, nella saldatura, ecc.

L'amalgama e l'argentatura degli specchi stanno pure applicate al vetro per semplice adesione.

3. *L'adesione cresce col crescere dell'estensione, della levigatezza e nettezza delle superfici* ; quindi l'uso di pulire e digrassare le superfici dei metalli e del vetro per argentarli.

4. L'adesione tra i solidi non è un effetto della pressione dell'aria, poichè si manifesta anche nel vuoto.

5. Essa è pure indipendente dalla grossezza o spessore dei corpi, il che dimostra che si esercita solo fra le molecole a contatto, e non fra le molecole che si trovano a distanza sensibile.

§ 7. La Dilatabilità.

1. **Dilatazione dei solidi.** — Una palla di metallo la quale (fig. 4, pag. 10) all'ordinaria temperatura passa giustamente per un anello, riscaldata non passa più, perchè ha aumentato di volume, ed in seguito per raffreddamento ripassa nuovamente per l'anello, perchè diminuisce di volume.

Una verga di metallo fissa ad un capo mediante una vite A (fig. 5) e di cui l'altro capo libero appoggia contro il braccio corto di un indice mobile su un quadrante, lo fa muovere su questo a misura che essa si allunga per riscaldamento, cessato il quale l'indice ritorna lentamente nella posizione primiera.

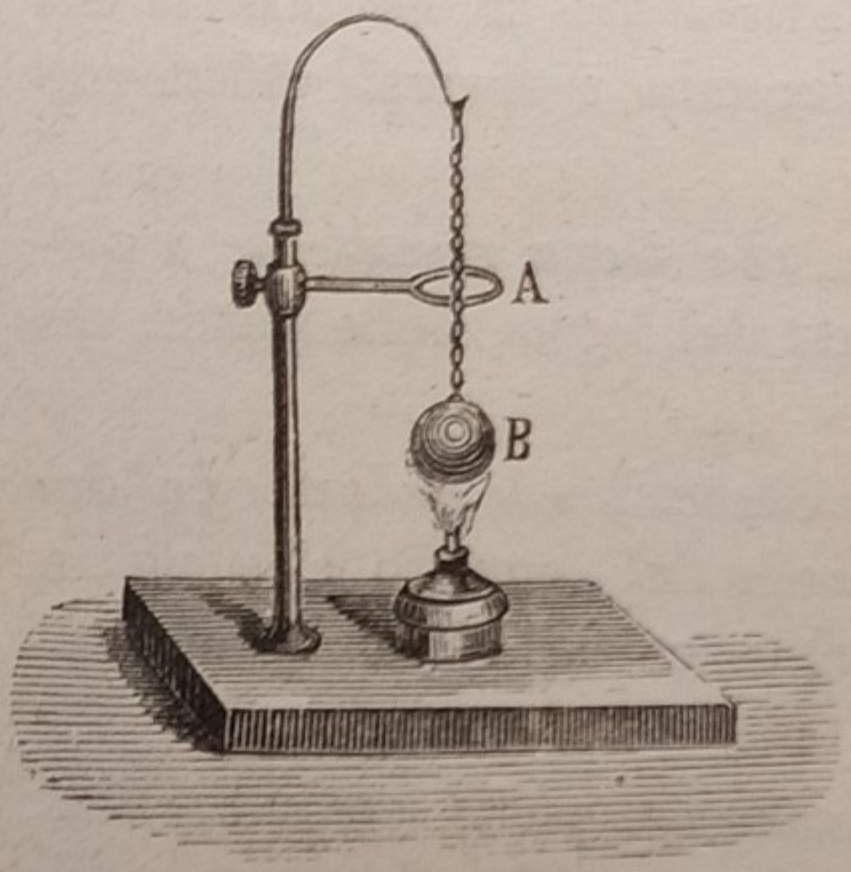


Fig. 4.

2. Applicazioni della dilatazione dei solidi. — I carradori prima di applicare il cerchio di ferro alle ruote lo riscaldano perchè esso si allarghi, e stringendosi poi col raffreddamento ne unisca i pezzi stabilmente.

I pezzi delle rotaie delle ferrovie non si pongono a contatto gli uni cogli altri, ma si lasciano separati da piccoli intervalli, perchè possano allungarsi nella state, senza uscire dai loro cu-

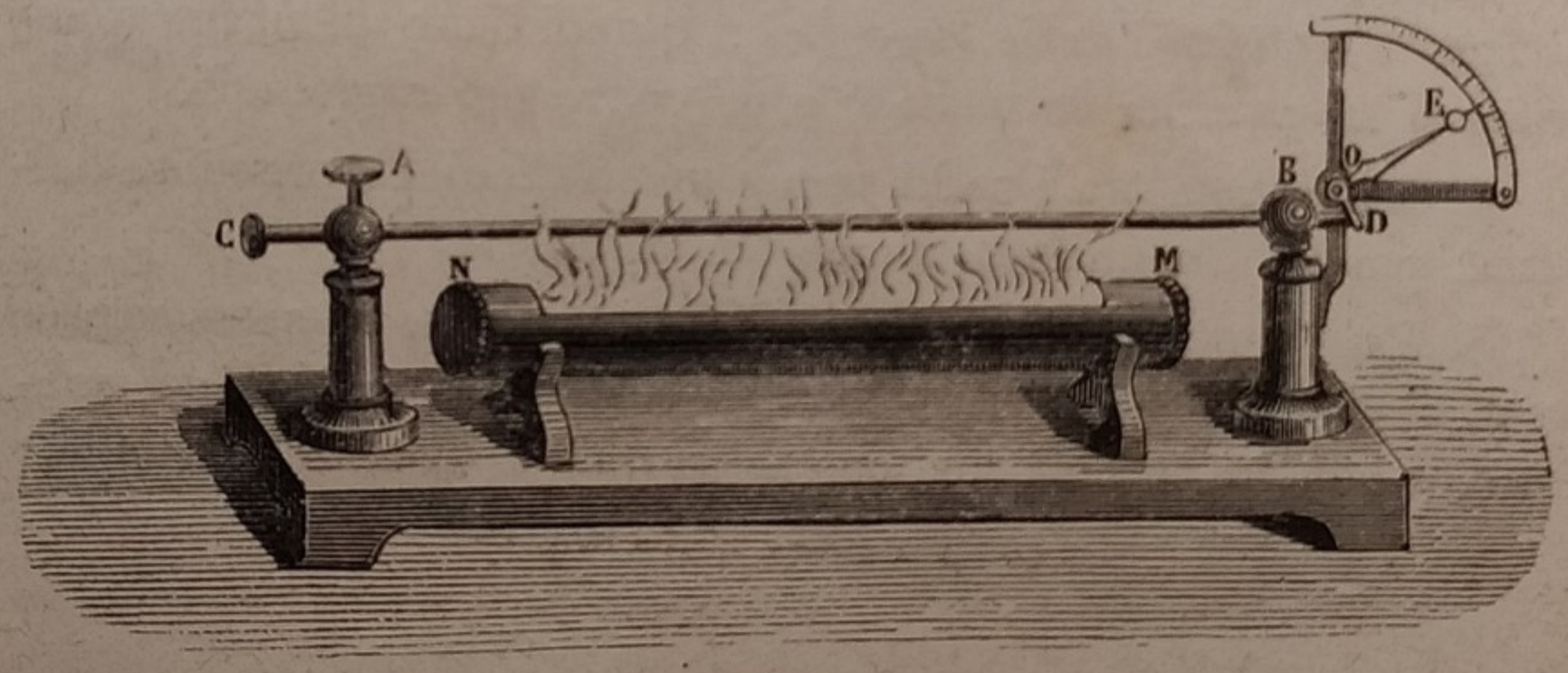


Fig. 5.

scinetti; le lastre dei tetti di zinco non vengono stabilmente inchiodate l'una coll'altra, ma solo sovrapposte negli orli, affinchè possano restringersi senza lacerarsi, e dilatarsi senza curvarsi.

Nel *Conservatorio delle arti* a Parigi si sono ricondotti a posto i muri di una galleria, i quali avevano ceduto sotto la pressione della volta, facendoli attraversare da sbarre di ferro munite di madreviti esterne; si riscaldarono le sbarre e si fecero avan-

zare le madreviti fino a contatto dei muri; nel raffreddamento le sbarre si accorciarono e li rimisero a posto.

3. Prove della dilatazione dei liquidi. — Si *dimostra la dilatazione dei liquidi* col seguente esperimento. Alla bocca di un palloncino di vetro pieno di acqua colorata (perchè sia meglio visibile) si applica un tappo attraversato da un cannello di vetro per modo che il liquido si sollevi alquanto nel medesimo (fig. 6). Quindi lo si immerge nell'acqua calda e si vede dapprima il liquido discendere del cannello e poi sollevarsi.

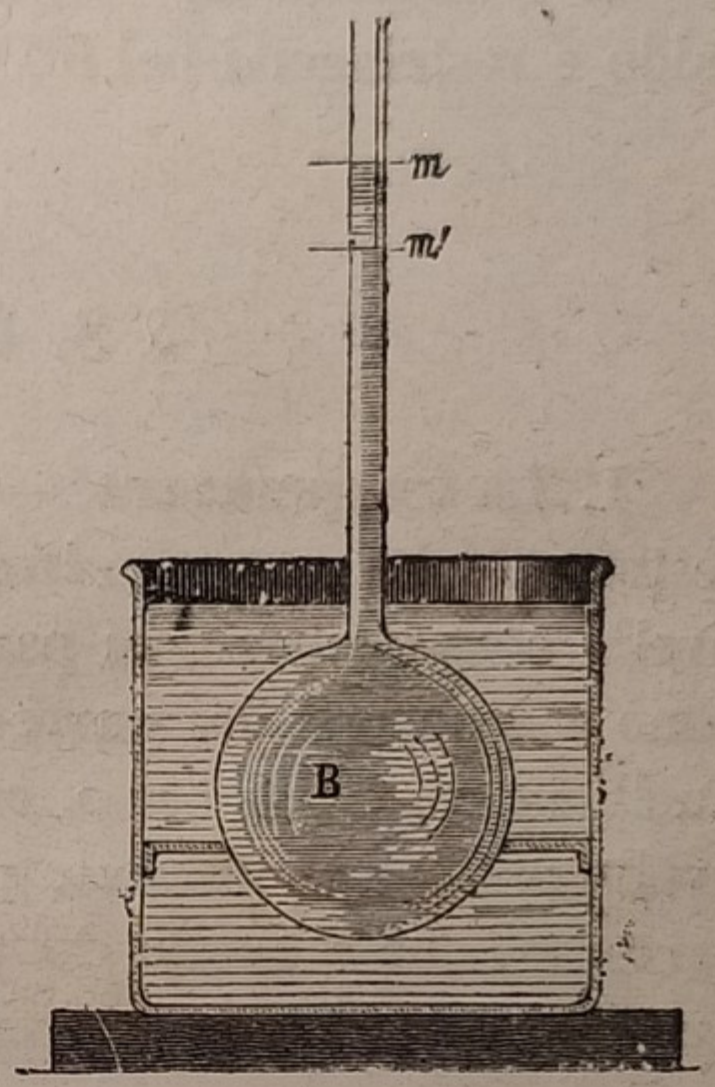


Fig. 6.

Il primitivo abbassamento del liquido è manifestamente dovuto all'aumento di capacità del recipiente che si dilata prima del liquido, ed il sollevamento successivo di questo dimostra che esso si dilata più che il recipiente.

Applicazioni della dilatazione dei liquidi sono i termometri a mercurio e ad alcool, come ora vedremo.

4. Prove della dilatazione del gas. — Se una bolla di vetro comunica con un cannello nel quale si trova una colonnetta di liquido che serve da indice (fig. 7), il più leggiero riscaldamento o raffreddamento dell'aria contenuta nella bolla fa muovere l'indice.

Fig. 7.

Una vescica ben legata nella suà bocca, collocata su una stufa, si gonfia. Il gas carbonico nelle bottiglie di acque gazose, di birra o di vino spumante, talvolta fa saltare il tappo allorchè sente il calore.

Castagne, la cui scorza non venne tagliata, riscaldate, scoppiano sovente per l'espansione dei gas o vapori rinchiusi. Così pure scoppietta sovente il legno per l'espansione dei gas o vapori imprigionati nelle sue cavità.

Un palloncino di caucciù pieno di gas idrogeno, come quelli che servono di trastullo ai ragazzi perchè si sollevano nell'aria, messo in vicinanza del fuoco scoppia per l'espansione del gas.

5. Legge generale della dilatazione pel calore. — Dagli esposti fenomeni risulta la seguente legge generale: *pel calore i corpi si dilatano, e pel freddo si restringono.*

6. Dilatabilità. — La proprietà dei corpi di dilatarsi pel caldo e restringersi pel freddo si dice *dilatabilità.*

§ 8. Il Termometro.

1. La temperatura. — Come le acque della superficie terrestre possono avere un livello più o meno elevato rispetto ad un livello convenzionale di partenza, che è quello del mare, e tendono a muoversi dai punti in cui il loro livello è più elevato a quelli in cui è più basso, così il calore può avere nei corpi un livello più o meno elevato rispetto ad un livello convenzionale di partenza, che è quello del ghiaccio fondente, e tende come i liquidi a passare dai corpi in cui esso è più elevato a quelli in cui è più basso.

La diversa altezza o livello che il calore ha nei corpi si dice *temperatura.*

Ora, sebbene i corpi producano in noi le impressioni del caldo e del freddo, tuttavia i nostri sensi non sono atti a misurarne la temperatura. Infatti, se immergiamo una mano nell'acqua fresca e l'altra nell'acqua calda, e poi ambedue nell'acqua tiepida, noi proviamo colla prima mano la sensazione del caldo, e colla seconda la sensazione del freddo. Così pure, entrando in una cantina alquanto profonda, sentiamo tepore nell'inverno e frescura nell'estate, quantunque la temperatura vi sia sempre la stessa, perchè ad una certa profondità, variabile coi luoghi, si trova il così detto *strato di temperatura invariabile*, in cui cioè la temperatura mai non varia.

2. Termometri. — Quindi per misurare il livello del calore, cioè la temperatura dei corpi, si usano stromenti detti *termometri*, i quali sono fondati sulla dilatazione dei corpi pel calore.

Se ne costruiscono di diverse sorta. Quelli più comuni sono i *termometri a mercurio* e *ad alcool*, i quali consistono in un cannello sottile di vetro, chiuso in alto, e terminato inferiormente

da una dilatazione cilindrica o sferica, detta *bulbo* (fig. 8). Questo ed una parte del cannello contengono mercurio, od alcool colorato in rosso perchè sia più visibile, e l'altezza del liquido nel cannello si legge su una scala graduata, la quale è segnata, o sul vetro stesso, o su una tavoletta di legno o metallo su cui è applicato il recipiente.

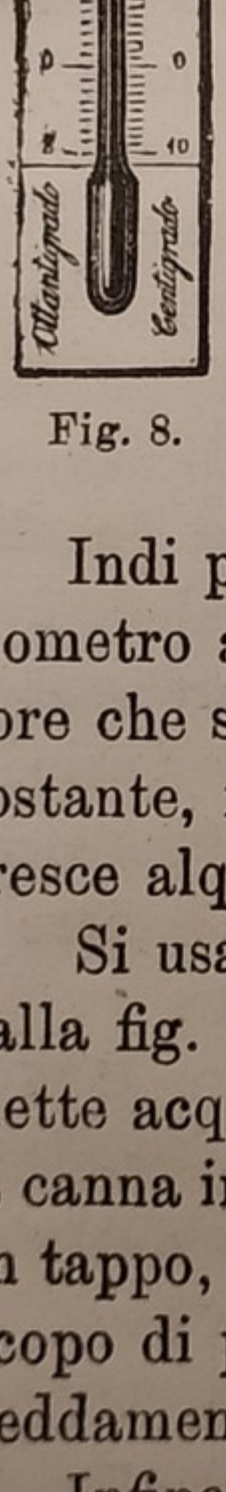


Fig. 8.

3. Graduazione. — Per costruire la *scala* della temperatura si è convenuto di prendere per punto di partenza, cioè per temperatura zero, quella del ghiaccio fondente. E per determinarla si immerge il bulbo e una parte del cannello nella neve, o nel ghiaccio pesto e fondente, contenuto in un recipiente bucato (fig. 9), perchè l'acqua proveniente dalla fusione del ghiaccio ne possa uscire. Allora il liquido discende fino ad un certo punto ove rimane stazionario per tutto il tempo che il termometro sta immerso nel ghiaccio fondente. Si fa un segno nel detto punto e ivi si segna 0°.

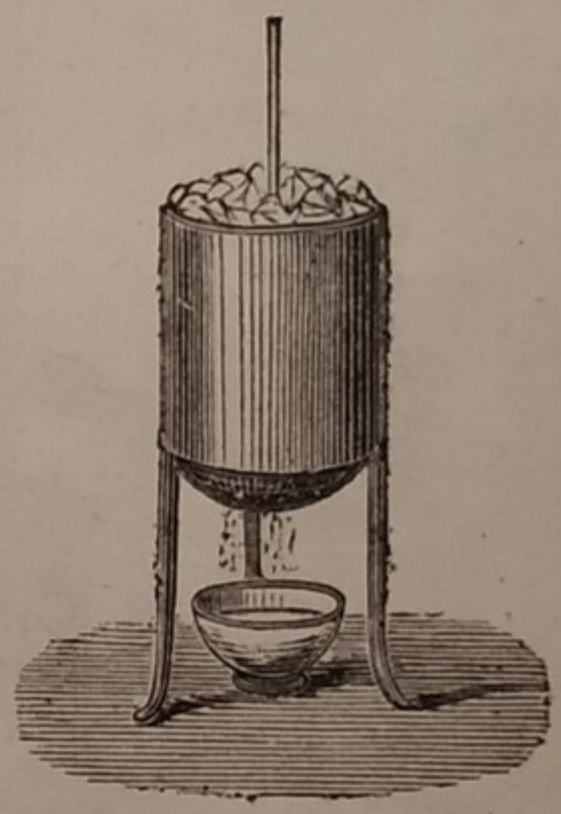


Fig. 9.

Indi per segnare il secondo punto fisso della scala di un termometro a mercurio, lo si espone alla temperatura che ha il vapore che si solleva dall'acqua bollente, la quale temperatura è costante, mentre quella di una colonna d'acqua piuttosto alta cresce alquanto colla profondità.

Si usa a tale scopo l'apparecchio rappresentato in sezione dalla fig. 10, il quale è un recipiente (A) di metallo in cui si mette acqua che si riscalda fino all'ebollizione. Il vapore sale per la canna interna che circonda il termometro (T) sospeso mediante un tappo, e poi scende per la canna esterna (B), la quale ha per iscopo di proteggere il vapore circostante al termometro dal raffreddamento esterno.

Infine, il vapore esce per un cannello (E) condensandosi in parte e gocciolando. Lateralmente vi è un piccolo *manometro* (M), cioè uno strumento che serve a misurare la pressione del vapore.

Consiste in un tubo di vetro piegato ad U contenente un poco di acqua o acido solforico. Esso ha per scopo di indicare se la pressione del vapore è eguale a quella dell'aria esterna (nel qual caso il liquido ha lo stesso livello nei due rami), perchè se tale pressione fosse maggiore sarebbe pure maggiore la temperatura del vapore.

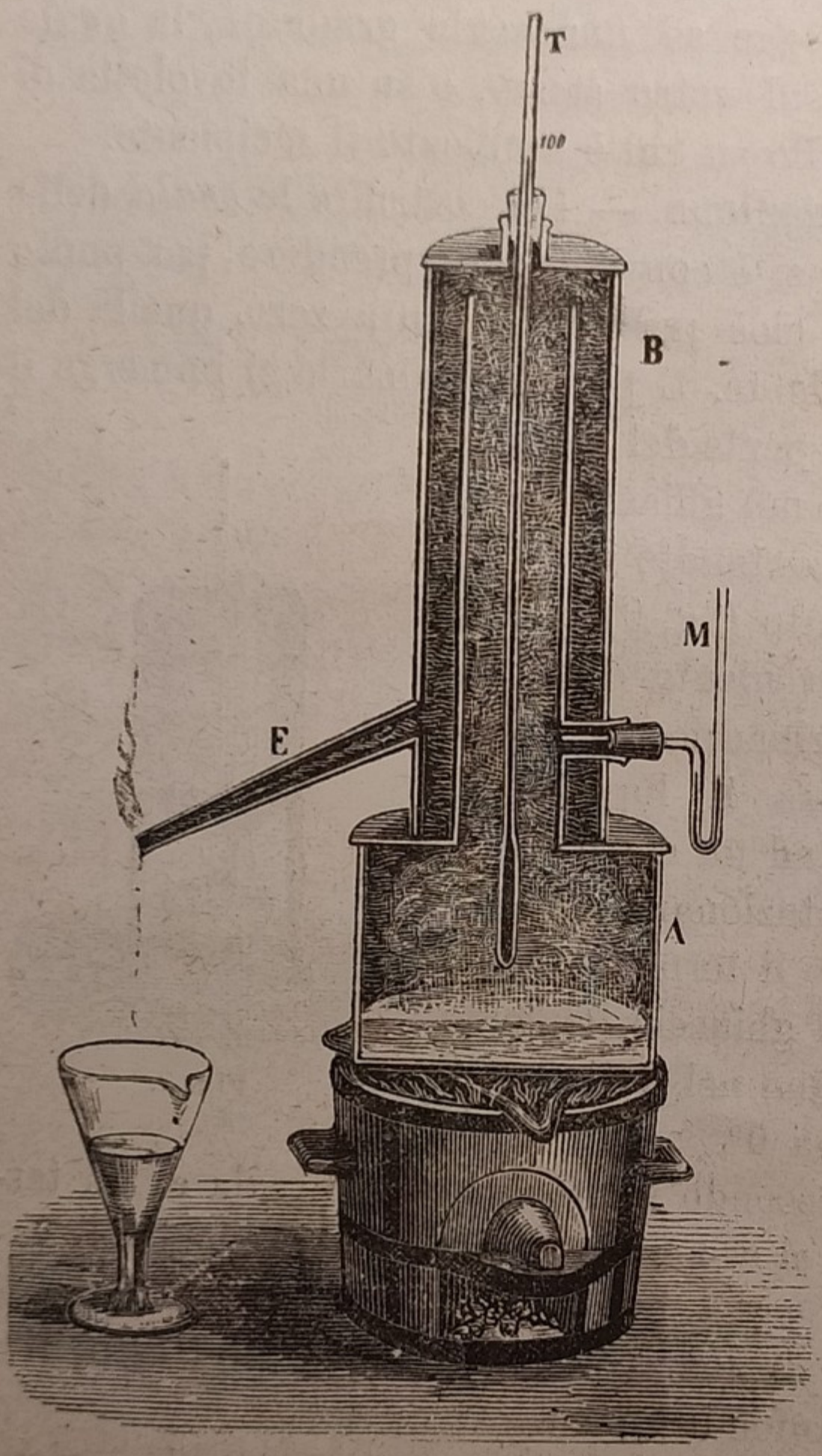


Fig. 10.

Il termometro rimane così esposto alla detta temperatura, la quale è pure costante come quella del ghiaccio fondente, purchè sia costante la pressione dell'aria, e perciò il mercurio sale fino ad un determinato punto ove rimane stazionario. Ivi si fa un segno e si segna 100, purchè la pressione dell'aria indicata dal barometro sia eguale a quella normale del livello del mare, cioè a 76 *cm.* di mercurio. Se l'altezza barometrica è minore o maggiore di 76 *cm.*, allora in quel punto si deve segnare un numero minore o maggiore di 100, come vedremo nello studio del calore.

Il termometro ad alcool non si può esporre alla temperatura dell'acqua bollente, perchè quel liquido, che bolle a + 78°, si ridurrebbe in vapore, che colla sua forza espansiva farebbe crepare il recipiente. Perciò dopo avere in esso segnato lo zero, come si è detto sopra, si gradua solo fino a + 50° circa mediante confronto con un termometro a mercurio.

Questo serve specialmente per le elevate temperature, perchè quel liquido non bolle che verso i 360°. Invece il termometro ad alcool serve specialmente per le basse temperature, perchè tal liquido non si congela che a 130° circa sotto lo zero, mentre il mercurio si congela a — 40°, e quando i corpi cangiano stato la loro dilatazione non è più regolare.

4. Diverse scale termometriche. — Determinati così i due punti fissi, 0 e 100, si divide l'intervallo in 100 parti di eguale capacità, e si prolunga la graduazione oltre quei punti.

Ciascuna divisione si chiama *grado*, e si indica scrivendo *o* al disopra e alquanto a destra del numero dei gradi. Di più questi si distinguono col segno +, oppure —, secondochè sono al disopra o al disotto dello zero. Così + 20° significa 20 gradi sopra lo zero, — 10° significa 10 gradi sotto lo zero.

Il termometro così graduato, cioè diviso in 100 gradi, si dice *centigrado* o di Celsius, ed è il più usato in Francia, in Italia, ecc.

Ma si usano anche altre due scale termometriche, cioè la scala ottantigrada o di Réaumur, specialmente in Germania; e la scala di Fahrenheit, in Inghilterra e nell'America del nord, come pure in Olanda.

La scala ottantigrada, o di Réaumur, non differisce dalla centigrada se non per ciò che in essa la temperatura dell'acqua bollente è segnata col n° 80 invece del n° 100, e quindi l'intervallo fra questa temperatura e quella del ghiaccio fondente è diviso in 80 parti eguali.

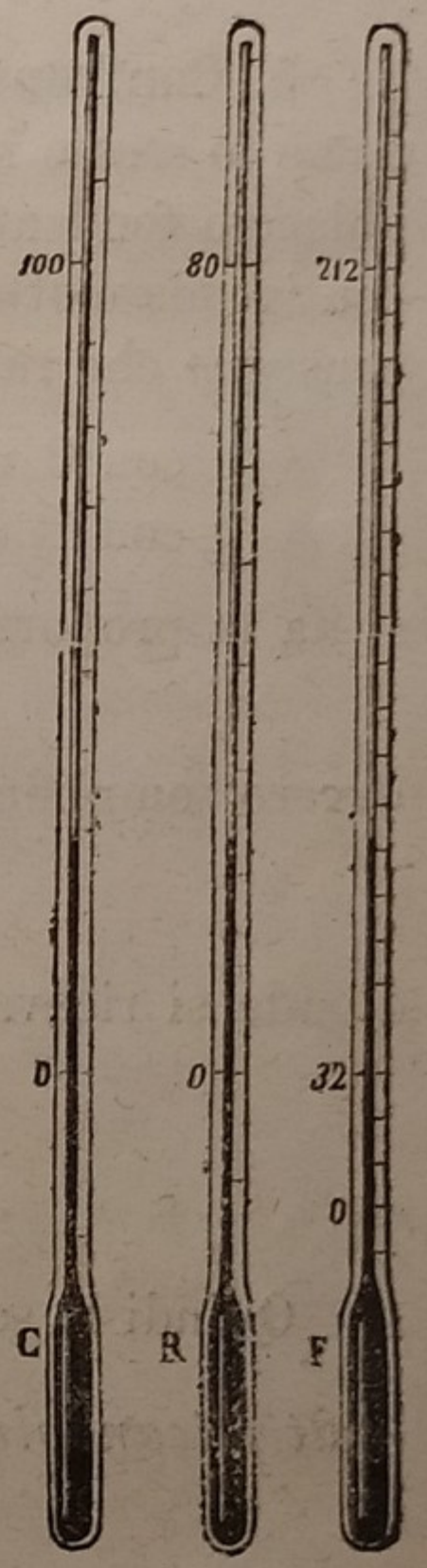


Fig. 11.

Invece nella scala di Fahrenheit lo zero non corrisponde alla temperatura del ghiaccio fondente, ma bensì a quella di un miscuglio frigorifico che si ottiene mescolando pesi eguali di ghiaccio pesto, o neve, e sale ammoniaco triturato; e la temperatura del vapore dell'acqua bollente è indicata col n° 212 (fig. 11).

L'intervallo fra le dette temperature è poi diviso in 212 parti eguali.

Questo termometro immerso nel ghiaccio fondente segna 32° sopra il rispettivo zero. Perciò l'intervallo fra la temperatura del ghiaccio fondente e quella dell'acqua bollente è in esso diviso in $212 - 32 = 180$ gradi.

Si distinguono i gradi Celsius colla lettera C,
» » Réaumur » R,
» » Fahrenheit » F.

5. Confronto fra i gradi centigradi e ottantigradi. — Siccome lo stesso intervallo di temperatura, compresa fra quella del ghiaccio fondente e quella dell'acqua bollente, è nelle due scale centigrada e ottantigrada diviso in 100 e 80 parti eguali (fig. 11), consegue che rappresentando

con C un numero di gradi centigradi,
con R il numero corrispondente di gradi ottantigradi,

si ha la proporzione:

$$C : R = 100 : 80,$$

ovvero semplificando:

$$C : R = 5 : 4;$$

d'onde si ricava:

$$C = R \times \frac{5}{4};$$

$$R = C \times \frac{4}{5}.$$

Quindi la seguente *regola: i gradi* R *si riducono in gradi* C *moltiplicandoli per* $\frac{5}{4}$; *e i gradi* C *si riducono in gradi* R *moltiplicandoli per* $\frac{4}{5}$.

6. Rapporto fra i gradi centigradi e i gradi Fahrenheit. — Poichè il termometro Fahrenheit immerso nel ghiaccio fondente segna 32° sopra il rispettivo zero, è evidente che per trasformare un numero dato F di gradi Fahrenheit in gradi C si deve da quelli sottrarre 32, per partire dalla stessa temperatura da cui partono i gradi C, e perciò si ha la proporzione:

$$(F - 32) : C = 180 : 100;$$

ovvero semplificando: $(F - 32) : C = 9 : 5$;

d'onde si ricava: $$C = \frac{5}{9}(F - 32),$$

$$F - 32 = C \times \frac{9}{5},$$

e perciò $$F = C \times \frac{9}{5} + 32.$$

Quindi la regola: *per ridurre i gradi* F *in* C, *devesi da quelli sottrarre* 32 *e poi moltiplicare il resto per* $^5/_9$; *e per ridurre i gradi* C *in gradi* F *devonsi moltiplicare quelli per* $^9/_5$ *e poi aggiungere* 32.

7. Rapporto fra i gradi ottantigradi e i gradi Fahrenheit. — Ragionando come nel caso precedente, si vede che la relazione generale fra i gradi F e i gradi R è espressa dalla

proporzione: $(F - 32) : R = 180 : 80$

ovvero semplificando: $(F - 32) : R = 9 : 4$,

d'onde si ricava: $$R = \frac{4}{9}(F - 32),$$

$$F = \frac{9}{4} R + 32.$$

Consegue la regola: *per ridurre i gradi* F *in gradi* R, *devesi da quelli sottrarre* 32 *e poi moltiplicare il resto per* $^4/_9$; *e per ridurre i gradi* R *in gradi* F *debbonsi moltiplicare quelli per* $^9/_4$ *e poi aggiungere* 32.

§ 9. La Porosità.

1. Pori fisici. — Il fatto che i corpi diminuiscono di volume per pressione e per raffreddamento e aumentano di volume per diminuzione della pressione esterna e per riscaldamento, induce ad ammettere che le molecole dei corpi non sono a contatto, ma sono separate da intervalli più o meno grandi, che si dicono *pori*, e la proprietà dei corpi di essere forniti di pori chiamasi *porosità*.

Però si debbono distinguere i *pori fisici* e i *pori sensibili*.

I *pori fisici* o *molecolari* sono gli intervalli esistenti fra le molecole. Queste non si possono vedere neppure col microscopio, ma si debbono ammettere sopratutto pel fatto della dilatazione dei corpi pel calore e contrazione pel freddo, senza variazione del loro peso, il che può solo avvenire per l'allontanamento od avvicinamento delle loro molecole.

2. I pori sensibili sono vere lacune esistenti nella materia dei corpi, le quali sovente sono visibili, o ad occhio nudo, o col microscopio, come nelle spugne, nei legni, nella pietra pomice.

L'esistenza di questi pori sensibili è anche dimostrata dai seguenti esperimenti.

Se si immerge un'estremità di un pezzo di zucchero nel caffè, si vede il liquido salire nel medesimo ed imbeverlo interamente. Similmente un pezzo di legno a contatto dell'acqua si gonfia, perchè essa penetra nei suoi pori.

Se si immerge un pezzo di calce nell'acqua si veggono sollevarsi numerose bollicine di aria, che stava nei pori della calce e che ne è scacciata dall'acqua che vi penetra energicamente.

Per dimostrare la porosità del cuoio e del legno si fa anche l'esperimento detto della *pioggia di mercurio*. Si fissa un disco di legno, o di cuoio, nella parte superiore di un tubo di vetro, e poi si versa mercurio al disopra del disco ; togliendo infine l'aria nel tubo al di sotto del disco colla pompa pneumatica si vede cadere nel medesimo una pioggia di minute goccioline di mercurio, le quali passano pei pori del legno.

3. Applicazioni. — Si approfitta della porosità nei filtri di carta, di feltro, di carbone. I pori di tali corpi sono abbastanza grandi per lasciar passare le particelle del liquido, ma non abbastanza per lasciar passare le particelle solide sospese nel medesimo.

Capitolo II.

NOZIONI DI MECCANICA GENERALE

§ 10. Moto rettilineo e curvilineo, uniforme e vario.

1. Moto e quiete. — Tutti i fenomeni naturali dipendono dai movimenti della materia. Quindi lo studio del moto è indispensabile per intenderli.

Un corpo si dice in moto quando esso, od anche solo una parte dei suoi punti, cangiano luogo nello spazio. Così è in moto un corpo cadente, come pure una ruota che giri solo attorno al suo asse senza progredire, perchè nel 1° caso tutti i punti del corpo mutano luogo nello spazio, e nel 2° tutti i punti della ruota collocati fuori del suo asse descrivono circonferenze attorno a questo.

Invece un corpo si dice in *quiete* quando tutti i suoi punti non mutano luogo nello spazio.

2. Quiete e moto assoluti e relativi. — Chi sta seduto in una camera è in quiete relativamente a chi passeggia in questa, ma non è in *quiete assoluta* o *perfetta*, perchè partecipa ai diversi movimenti della terra, fra i quali i due principali sono quello di rotazione attorno al suo asse e quello di rivoluzione attorno al sole. E siccome al pari della terra tutti i corpi celesti si muovono, perciò non si dà in natura la *quiete assoluta*, ma solo la *quiete relativa*, cioè la quiete relativamente a punti che si muovono.

Non esistendo la quiete assoluta, non esiste neppure il *moto assoluto*, cioè il moto di un corpo rispetto ad un altro in quiete assoluta, ma solo il moto relativo, cioè il moto di un corpo rispetto

ad un altro in quiete relativa, il quale del resto avviene come se tale quiete fosse assoluta. Per es., quando i corpi cadono si muovono rispetto alla terra come se questa fosse in quiete assoluta, perchè i movimenti della terra esistono anche nel corpo e quindi sono fattori comuni ai due corpi di cui si considerano i rapporti di distanza, dai quali si può fare astrazione.

3. Mobile. — Un corpo le cui dimensioni sieno trascurabili si dice *punto materiale*. Ogni corpo si può considerare come un complesso di punti materiali.

Il corpo o il punto materiale che si muove si dice *mobile*.

4. Trajettoria. — Quando un punto geometrico si muove nello spazio descrive una linea che dicesi *trajettoria*. Ora un corpo potendosi considerare come un complesso di punti materiali, ciascuno di essi, nel caso del movimento, descrive la sua traiettoria.

Ma quando si parla della traiettoria di un corpo, per es. di un proiettile, si intende quella descritta dal punto in cui si può considerare come raccolta la sua materia che, nel caso di un proiettile sferico e omogeneo, è il suo centro di figura.

5. Moto rettilineo e curvilineo, progressivo e rotatorio. — Relativamente alla traiettoria il moto si distingue dapprima in *rettilineo* e *curvilineo* secondochè la traiettoria è una linea retta o curva.

Presentano esempio di moto rettilineo i corpi liberamente cadenti, di moto curvilineo i corpi proiettati obliquamente alla direzione della forza che li fa cadere, cioè della gravità.

Di più, quando si considera il movimento di un corpo, cioè di un complesso di punti, lo si distingue ancora relativamente alla traiettoria, in *progressivo* e *rotatorio*, secondochè tutti i suoi punti descrivono traiettorie identiche, ovvero solo simili, ma non identiche. Così quando un corpo cade liberamente ha un moto progressivo, perchè tutti i suoi punti descrivono rette eguali e parallele; invece quando una carrucola gira sul suo asse tutti i suoi punti descrivono circonferenze che sono curve simili, ma non identiche.

Ogni corpo non può avere che un moto progressivo o rotatorio, ovvero un moto composto da questi due, come la terra e tutti i pianeti attorno al sole.

6. Direzione e verso del moto. — Infine nel moto si deve considerare la *direzione* nello spazio, che è determinata dalla traiettoria, e il *verso*, che è il senso in cui si muove il corpo nella traiettoria, il quale può essere indicato mediante una punta di freccia.

Nel moto rettilineo la direzione è costante, nel moto curvilineo varia continuamente, e in un dato punto è determinata dalla tangente alla curva in quel punto.

7. Moto uniforme e vario. — Quando un corpo si muove può percorrere spazii eguali in tempi eguali, comunque piccoli,o no. Nel 1° caso il moto si dice *uniforme*, e nel 2° *vario*. Così il moto di rotazione della terra sul suo asse è uniforme, perchè tutti i suoi punti collocati alla stessa distanza dall'asse descrivono archi eguali in tempi eguali, grandi o piccoli. Invece la lancetta dei secondi di un oriuolo ha un moto vario, perchè descrive bensì $^1/_{60}$ di circonferenza ad ogni secondo, ma va a scatti. Parimente è vario il moto di rivoluzione della terra e in generale dei pianeti attorno al sole. Il moto di un convoglio e di una nave è vario al principio e alla fine, e diviene uniforme quando l'azione della forza motrice è ad ogni istante equilibrata dall'azione delle resistenze dell'aria o dell'acqua e dagli attriti.

8. Moto uniformemente accelerato e ritardato. — Quando un corpo cade liberamente percorre nel

1° secondo 5 *m.* circa
2° » $5 \times 3 = 15$ *m.* circa
3° » $5 \times 5 = 25$ »

cioè gli spazii percorsi nei successivi minuti secondi crescono di 10 *m.* circa. Viceversa quando un corpo sale gli spazii che percorre nei successivi minuti secondi decrescono di circa 10 metri ogni secondo.

Dunque, quando il moto è vario può darsi che gli spazii percorsi in tempi eguali successivi qualunque crescano o diminuiscano di una quantità costante. In tal caso il moto si dice: *uniformemente vario*, e si distingue in *uniformemente accelerato* o *ritardato*, secondochè gli spazi crescono o diminuiscono di una quantità costante.

9. Velocità nel moto uniforme. — Il moto di un cavallo, o di un convoglio, o di un proiettile, si dice *veloce* o *lento* secondochè il mobile percorre grande o piccolo spazio in un dato tempo. Dunque la *velocità di un corpo in moto è l'attitudine che esso possiede a percorrere uno spazio più o meno grande in un dato tempo.*

Siccome nel moto uniforme gli spazi percorsi in tempi eguali sono eguali, perciò in tale moto la velocità è costante e si misura mediante lo spazio percorso nell'unità di tempo, che è generalmente il minuto secondo. Così si dice che la velocità dei corpi all'equatore è di 465 *m.* per secondo, perchè tale è la lunghezza dell'arco che essi percorrono in ogni secondo.

10. Velocità nel moto vario. — Nel moto vario, come quello di un corpo cadente, la velocità varia continuamente da un istante all'altro; quindi si deve distinguere la *velocità di un dato istante.* e la *velocità media di un dato intervallo di tempo.*

Si misura la *velocità di un dato istante del moto vario* mediante *lo spazio che il corpo percorrerebbe in* 1 *secondo se si muovesse per questo tempo colla velocità di quell'istante.*

Per es. quando si dice che la velocità di un corpo liberamente cadente dopo 1 secondo è circa 10 *m.* (più precisamente 9,81 m.) si intende che se si muovesse per un altro secondo colla velocità che ha alla fine del 1°, percorrerebbe circa 10 *m.*; ma in realtà nel 2° minuto esso percorre uno spazio maggiore di 10 *m.*, perchè la sua velocità viene continuamente accresciuta dalla forza che lo fa cadere.

Così l'idea della velocità nel moto vario viene determinata mediante quella più semplice del moto uniforme.

11. Velocità media. — Se lo spazio percorso da un mobile in un dato tempo con moto vario viene diviso per il tempo stesso, allora si ha la *velocità media* del mobile durante quel tempo. Per es., se un convoglio percorre con moto vario 300 *km.* in 5 ore, la sua velocità media è

$$\frac{300}{5} = 60 \text{ } km. \text{ all'ora,}$$

oppure

$$\frac{60}{60} = 1 \text{ } km. \text{ al minuto primo.}$$

12. Velocità nel moto curvilineo. — Infine è da notare che quanto si è detto intorno alla velocità vale tanto pel moto rettilineo quanto pel moto curvilineo, con la sola differenza che mentre nel primo è costante la direzione del moto, nel secondo essa varia continuamente.

§ 11. Formole e leggi del moto uniforme.

1. Formola dello spazio. — Poichè nel moto uniforme la velocità è costante ed è misurata dallo spazio percorso nell'unità di tempo (pag. 21), rappresentandola colla lettera v, è evidente che lo spazio s percorso in t unità di tempo sarà t volte maggiore, cioè sarà:

$$s = vt \qquad \ldots\ldots (1).$$

Dunque: *nel moto uniforme lo spazio percorso dal mobile in un tempo qualunque è dato dal prodotto della velocità per il tempo.*

Siccome per un dato moto uniforme la velocità v è costante, consegue che la grandezza dello spazio s dipende solo dalla grandezza del tempo t, cioè: *lo spazio è proporzionale al tempo.*

2. Formola della velocità. — Dalla formola $s = vt$, si ricava:

$$v = \frac{s}{t}.$$

Dunque: *nel moto uniforme la velocità è data dal quoziente del numero che esprime lo spazio a quello che rappresenta il tempo.*

3. Formola del tempo. — Infine dalla formola (1) si ricava:

$$t = \frac{s}{v},$$

la quale significa che: *il tempo impiegato da un mobile a percorrere un dato spazio con moto uniforme è dato dal quoziente dello spazio alla velocità.*

§ 12. L'Inerzia.

1. L'inerzia nei corpi in quiete. — Le palle sul bigliardo non si muovono se non ricevono un urto dalla stecca del giuocatore o da un'altra palla in moto. Così pure una boccia da giuoco non si muove su un terreno orizzontale se non riceve il movimento o dalla mano del giuocatore o da un'altra palla in moto, e un convoglio non si muove su una ferrovia orizzontale se non è trascinato o spinto dalla locomotiva.

Quindi si deve ammettere che ogni corpo inanimato in quiete rimane in tale stato finchè non riceve il movimento da un altro corpo in moto.

Egli è ben vero che ogni corpo abbandonato a sè cade, cioè si muove verso la terra, anche senza che noi gli comunichiamo alcuna spinta. Ma ciò avviene perchè sui corpi terrestri agisce continuamente la forza di attrazione della terra, ossia la gravità, la quale è la causa del loro peso.

Un'altra eccezione apparente a questo fatto ci viene presentata dai corpi animati, i quali si danno il moto da sè; ma anche questo moto non nasce dal nulla, ma da altri movimenti, perchè ogni animale si muove mediante contrazioni muscolari, ed ogni contrazione muscolare è accompagnata da fenomeni chimici che avvengono nei muscoli, ed in ogni fenomeno chimico avvengono movimenti degli atomi. Perciò l'animale che lavora ha bisogno di maggiore nutrimento dell'animale che riposa.

2. L'inerzia nei corpi in moto. — Quando una boccia ha ricevuto il moto dalla mano del giuocatore lo conserva tanto più a lungo quanto più liscio è il terreno su cui rotola. Così pure una pietra sul ghiaccio liscio si muove più a lungo che sul terreno, e i convogli si muovono più a lungo sulle rotaie che non sul terreno, perchè sono più liscie e presentano meno resistenza al moto. Queste osservazioni insegnano che il movimento di un corpo si conserva tanto più a lungo quanto minori sono le resistenze al moto, onde si deve concludere che esso durerebbe eternamente se le resistenze fossero nulle.

Di più i convogli nelle curve tendono ad uscire dalle rotaie, cioè a deviare, per proseguire in linea retta, e la pietra che viene fatta girare colla fionda tende continuamente a scappare nella direzione rettilinea della tangente alla circonferenza che le viene fatta descrivere, e sfugge effettivamente in tale direzione quando si lascia libero un capo della fionda.

Dunque un corpo in moto tende a conservare costante la velocità e la direzione del suo moto.

3. Legge d'inerzia. — Quindi si deve concludere che: *la materia ha la tendenza a conservare lo stato di quiete o di moto in cui si trova* (1ª legge della meccanica).

Tale fatto costituisce la così detta *inerzia*. Nel caso del moto essa comprende la *velocità* e la *direzione*; quindi si deve distinguere l'*inerzia di velocità* e l'*inerzia di direzione*.

4. Effetti dell'inerzia. — L'inerzia si manifesta anche nel nostro corpo quando passa dalla quiete al moto nella seguente maniera. Chi si trova seduto in una vettura che parte repentinamente urta colla schiena all'indietro, e chi è in piedi si sente trascinato a cadere all'indietro, perchè la parte inferiore del corpo, che è in contatto colla vettura, si muove subito con questa e prima della parte superiore, che perciò rimane indietro.

Manifestazioni dell'*inerzia di velocità* del nostro corpo, quando passa dal moto alla quiete, sono i seguenti fenomeni: quando ci troviamo in una vettura o barca in moto, la quale repentinamente si arresti, la parte superiore del nostro corpo tende a cadere nella direzione della velocità che aveva.

Così pure quando discendiamo da una vettura in moto, mettendo i piedi a terra, ci sentiamo trascinati a cadere nella direzione in cui ci movevamo. E per evitare la caduta bisogna, o darsi nel discendere una spinta in senso contrario al moto che si aveva, oppure fare alcuni passi sul suolo per arrestare il moto a poco a poco.

Perciò non si deve mai discendere da una vettura in moto colla schiena rivolta nella direzione di questo, per non esporsi al pericolo di cadere all'indietro.

Per causa dell'inerzia, una persona che corre, se inciampa in qualche ostacolo, cade a terra nella direzione del suo moto; e quando un cavallo repentinamente si arresta, il cavaliere sovra-

stante fa un salto verso la testa di quello, se non si tiene colle gambe bene fermo in arcione.

Per saltare un fosso noi pigliamo la spinta, cioè comunichiamo al nostro corpo una certa velocità, la quale lo trasporta dall'altra parte.

Infine l'*inerzia di direzione*, cioè la tendenza dei corpi a conservare la direzione del loro moto, si manifesta nei convogli quando deviano nelle curve, ove sono costretti a mutare continuamente la direzione rettilinea in cui tendono a progredire: nella fionda, in cui la pietra, che viene fatta girare, tende ad ogni istante a scappare nella direzione rettilinea della tangente alla circonferenza che la mano le fa percorrere; così pure il cavallo e il cavaliere nel circo si inclinano verso il centro per non cadere verso l'esterno per l'inerzia di direzione; e noi quando ci troviamo in piedi in una vettura di tramvia, nelle curve sentiamo una tendenza a cadere verso l'esterno.

5. Applicazioni dell' inerzia sono i *volanti* o *volani*, grandi ruote di ghisa che servono a regolare il movimento delle macchine, perchè conservano questo nei momenti in cui la forza motrice è meno efficace.

§ 13. Forze e loro classificazione.

1. Forze. — In relazione colla legge di inerzia (§ 12) tutte le volte che osserviamo verificarsi una variazione nello stato di quiete o di moto di un corpo deve essere intervenuta una causa. Le cause che modificano o tendono a modificare lo stato di un corpo si chiamano *forze*. Sono altrettante forze: quella che fa cadere i corpi, la quale dicesi *forza di gravità* od *attrazione terrestre;* quella della calamita che attrae il ferro; quella di un animale che trascina un carro; quella della elettricità che, fulminandoli, squarcia gli alberi.

2. Forze attrattive e repulsive. — Le forze si distinguono in *attrattive* e *repulsive*, secondochè producono avvicinamento od allontanamento dei corpi o delle loro particelle. Per es., se si strofina un pezzo di ceralacca o di vetro con lana o cuoio, esso acquista la proprietà di attrarre corpi leggieri, come ritagli di carta, o di paglia, pallottole di sambuco. Però, sovratutto con

queste ultime, si osserva che dopo il contatto col corpo strofinato avviene repulsione; cioè la forza che prima del contatto era attrattiva, dopo il contatto diviene repulsiva. Parimente siccome il calore dilata i corpi, e questi sono costituiti da molecole che non sono a contatto, si deve ammettere che il calore le allontana, e quindi che esercita una forza repulsiva. Invece è una forza attrattiva quella che fa cadere i corpi, cioè la *gravità*.

3. Forze istantanee e continue. — La forza che fa cadere i corpi agisce continuamente, non solo per tutta la durata della loro caduta, ma anche quando essi sono sostenuti dal suolo o da altro sostegno; ed è perciò appunto, come vedremo, che i corpi esercitano una pressione sui loro sostegni, la quale pressione costituisce il loro *peso*. Sono pure forze continue, l'attrazione della calamita sul ferro, di un corpo strofinato sugli altri corpi, ecc.

Invece quando una palla sul bigliardo o una boccia ne urta un'altra e la determina a muoversi, la palla in moto agisce su quella in riposo come una forza, perchè produce in essa un cambiamento mettendola in moto, ma la sua azione è brevissima, e perciò si dice forza *istantanea*, quantunque non sia assolutamente tale, ma solo relativamente, perchè quell'azione dura per un tempo che ha una durata apprezzabile, mentre per *istante* si intende un tempo infinitamente breve, e quindi inapprezzabile.

Inoltre si considerano come forze istantanee, la forza espansiva dei gas che si sviluppano nell'accensione della polvere pirica, la quale spinge i proiettili; la forza relativa ad una scarica elettrica, ecc. Però, matematicamente parlando, tutte le forze sono continue, e hanno solo una durata più o meno lunga.

4. Forze costanti e variabili. — Inoltre le forze continue si distinguono in *costanti* e *variabili*, secondochè conservano la stessa intensità per tutta la durata della loro azione, o no. Così la forza di gravità è una forza variabile, perchè cresce a misura che i corpi, cadendo, si avvicinano al centro della terra; ma per le ordinarie altezze di caduta si può considerare come costante, perchè l'avvicinamento dei corpi al centro della terra è una frazione insensibile della distanza del medesimo, che è più di 6 milioni di metri.

5. Diversi modi di azione delle forze sui corpi. — Alcune forze, come la gravità, l'attrazione elettrica e magnetica, ecc., agiscono direttamente e contemporaneamente su tutti gli atomi

dei corpi; altre solo sui punti della superficie, come la pressione dell'aria o di un liquido, altre infine solo su alcuni punti del corpo come le forze traenti che muovono i carri, la pressione che un corpo esercita su di un altro urtandolo.

In questi ultimi due casi le molecole premute o tirate, mediante i vincoli molecolari premono o tirano le più vicine, e queste le successive, e così via via finchè si manifesterà una tensione o pressione nei punti in cui il corpo è fissato, oppure si comunicherà il moto al medesimo. Per es., un lungo tubo di gomma disteso su una tavola si allunga prima di muoversi.

Ma il più sovente nei corpi solidi tali deformazioni si trascurano siccome piccolissime, o siccome quantità di ordine inferiore a quelle misurabili, e si considerano i solidi siccome corpi *rigidi*, cioè come sistemi di punti stabilmente uniti.

6. Equilibrio delle forze. — Quando due o più forze agiscono su di un corpo può darsi che esse non alterino lo stato di quiete o di movimento del medesimo.

In tale caso si dice che le forze si fanno *equilibrio*.

Per es., un corpo sostenuto da un piano orizzontale è in equilibrio rispetto alla gravità, perchè la resistenza del piano impedisce l'effetto di moto di questa forza; quando un convoglio si muove con moto uniforme vi è equilibrio tra l'azione della forza motrice e quella delle resistenze al moto, cioè dell'aria e dell'attrito.

L'equilibrio delle forze in un corpo in riposo si dice *statico*, e quello delle forze in un corpo in moto chiamasi *dinamico*.

7. Meccanica e sue parti. — La scienza che tratta delle forze e dei loro effetti dicesi *meccanica*.

In essa si distinguono tre parti, che si denominano *cinematica*, *statica* e *dinamica*.

La prima studia le leggi del moto indipendentemente dalle cause del medesimo, cioè dalle forze, ma solo rispetto allo spazio e al tempo. Invece la *dinamica* studia le leggi dei movimenti in relazione colle forze che li producono. La *statica* infine studia le condizioni d'equilibrio delle forze.

Ma per rendere lo studio elementare della meccanica più concreto e sperimentale, e quindi più facile, è preferibile riunire la cinematica colla dinamica e fare precedere ad esse lo studio della statica.

§ 14. Massa, Volume e Densità.

1. Massa. — Ogni corpo è costituito da una certa quantità di materia che si dice la sua *massa*. Anche nel linguaggio famigliare si dice *massiccio* un corpo che è pieno nel suo interno, e quindi che ha maggiore quantità di materia di un altro di egual volume, ma vuoto internamente.

Non si può conoscere la massa assoluta dei corpi ma solo la *massa relativa*, la quale si determina confrontandola con quella di un pari volume d'acqua. Tale confronto si fa mediante i loro pesi, poichè col crescere o diminuire della massa o quantità di materia cresce o diminuisce nella stessa misura il peso. Così quando si compera una merce il negoziante ne determina la massa misurandone il peso.

2. Volume. — Lo spazio occupato da un corpo dicesi *volume*. Siccome le molecole dei corpi non sono in contatto, perciò il volume di un corpo è la somma dei volumi delle sue molecole e degli spazi compresi fra queste.

3. Densità. — Nella geografia si denomina *densità media* di una popolazione il numero degli abitanti per chilometro quadrato, e la si ottiene dividendo il numero totale degli abitanti pel numero dei chilometri quadrati del paese in cui sono distribuiti.

Questa idea della densità media di una popolazione è ricavata dalla fisica in cui si denomina *densità* di un corpo supposto omogeneo *la quantità di materia o di massa dell'unità di volume*.

Essa si ottiene dividendo la massa totale del corpo pel suo volume. Per es., se la massa di 5 cm^3 di mercurio (determinata mediante il suo peso) è di 67,95 *gr.*, è evidente che la massa di 1 cm^3 di mercurio ossia la densità di questo rispetto all'acqua è

$$\frac{67,95}{5} = 13,59.$$

4. Formola della densità. — Ed in generale rappresentando

con m la massa di un corpo,

» v il suo volume,

» d la sua densità,

si ha $$d = \frac{m}{v}.$$

Da questa eguaglianza si ricava;

$$m = dv$$

cioè che *la massa di un corpo è data dal prodotto della sua densità pel suo volume.*

Per es., la densità del mercurio rispetto all'acqua essendo 13,59, la massa di 100 cm^3 di mercurio (misurata mediante il suo peso) è

$$m = 13{,}59 \times 100 = 1359\ gr. = 1{,}359\ kg.$$

Infine dalla formola $d = \frac{m}{v}$,

si ricava: $v = \frac{m}{d}$,

e ciò significa che: *dividendo la massa di un corpo per la sua densità, se ne ottiene il volume.*

Per es. il quoziente

$$\frac{1359}{13{,}59} = 100$$

della detta massa di mercurio per la sua densità ne dà il volume in cm^3.

§ 15. La gravità e il peso dei corpi.

1. La gravità. — Tutti i corpi non sostenuti cadono, cioè si muovono verso la terra. La forza che produce tale movimento si dice *gravità* o *attrazione terrestre*.

In che modo la terra comunichi questo movimento ai corpi è ancora ignoto. È probabile che ciò avvenga mediante l'etere interposto in cui tutti i corpi sono immersi.

Ma se è ignota la causa della attrazione, si conoscono perfettamente le leggi di questa forza, le quali vennero scoperte da Newton nel 1666. Egli provò dapprima che essa agisce non solo fra la terra e i corpi terrestri, ma anche fra la terra e la luna, ed è la causa per cui questo satellite viene ad ogni istante deviato dalla direzione rettilinea in cui tende a muoversi per inerzia e costretto a girare attorno alla terra. Indi Newton dedusse dalle leggi di Kepler relative ai movimenti dei pianeti attorno al sole, che essi girano attorno a questo in grazia dell'attrazione reciproca, denominata perciò *attrazione universale*, la quale agisce *in ragione diretta delle loro masse ed in ragione inversa dei quadrati delle loro distanze*.

È in grazia dell'attrazione universale che i corpi celesti minori girano regolarmente attorno ai maggiori più vicini, mentre per inerzia tenderebbero a progredire in linea retta.

Infine oggidì venne provato che anche i corpi terrestri si attraggono secondo l'enunciata legge. E se malgrado tale attrazione reciproca essi non si avvicinano, ciò avviene per le resistenze che si oppongono al loro avvicinamento, le quali sono maggiori della loro attrazione.

2. Peso dei corpi. — Conseguenza della gravità è il *peso*, cioè *la pressione che ogni corpo esercita sul sostegno che ne impedisce la caduta*.

Così noi vediamo pesanti carri lasciare dietro di sè la carreggiata nel molle terreno; grosse pietre e talvolta anche edifizi affondare nel suolo. Talvolta si giudica la quantità di materia di un corpo dalla pressione che esso esercita sulla mano.

Il peso di un corpo in un dato luogo è tanto maggiore quanto maggiore è la sua massa, perchè l'attrazione della terra cresce colla massa; perciò il peso serve a confrontare le masse, o come misura dell'attrazione che la terra esercita su di un corpo.

3. Peso assoluto. — Il peso dei corpi si distingue in *assoluto*, *relativo* e *specifico*.

Il peso assoluto è la pressione che un corpo esercita sul suo sostegno. Esso è proporzionale alla massa o quantità di materia dei corpi, e alla intensità della gravità che ne è la causa.

Perciò *per uno stesso corpo il peso assoluto varia coi luoghi*, perchè l'intensità della gravità, come vedremo, varia da un luogo ad un altro, *e per uno stesso luogo il peso assoluto varia solo col variare della massa.*

4. Peso relativo. — Si dice *peso relativo* quello che si determina colla bilancia, cioè il rapporto della pressione esercitata da un corpo a quella che esercita un altro, la cui pressione si prende per unità. Nel sistema metrico l'unità di peso è la pressione che esercita un centimetro cubo di acqua pura alla temperatura di $+ 4^{\circ}$, che è quella del suo minimo volume, o della sua massima densità.

Mentre il peso assoluto varia per uno stesso corpo coi luoghi, il peso relativo è costante, perchè variano nello stesso rapporto il peso del corpo e quello delle unità di peso.

5. Peso specifico. — Quando si determina colla bilancia il peso relativo dei corpi non si tiene conto del loro volume.

Ora, come i diversi corpi, a parità di volume, hanno diversa massa, così hanno pure diverso peso. Per es.:

1	cm^3	di acqua distillata a $+ 4^{\circ}$	pesa	1	*gr.*
1	»	ferro a 0°	»	7, 5	
1	»	piombo »	»	11, 35	
1	»	mercurio »	»	13, 59	
1	»	oro »	»	19, 3	ecc.

Il peso dell'unità di volume dei corpi si chiama *peso specifico.*

Per avere il peso dell'unità di volume dei corpi, o il loro peso specifico, non fa bisogno di ridurre i medesimi ad avere precisamente il volume 1, ma basta dividere il loro peso totale pel loro volume. Infatti, è evidente che se 100 cm^3 di mercurio pesano 1359 *gr.*, il peso di 1 cm^3 sarà

$$\frac{1359}{100} = 13{,}59.$$

6. Formola del peso specifico. — Ed in generale rappresentando

con P il peso di un corpo,
» V il suo volume,
» p il suo peso specifico,

si ha $$p = \frac{P}{V},$$

d'onde si ricava $$P = pV.$$

Un altro corpo di peso specifico p', avente lo stesso volume V, avrà il peso P′ diverso da P, ma si avrà pure $P' = p'V$. E quindi dividendo membro a membro la precedente eguaglianza per questa si ottiene:

$$\frac{P}{P'} = \frac{p}{p'};$$

e ciò significa che: *il rapporto dei pesi di volumi eguali di corpi diversi è eguale al rapporto dei loro pesi specifici.*

Infine, siccome nel sistema metrico si prende, per unità di peso, il peso di 1 cm^3 di acqua pura, consegue che *nel sistema metrico l'unità di peso è appunto il peso specifico dell'acqua.*

E nella misura dei pesi specifici si prende pure per unità quello dell'acqua, cioè si fa $p' = 1$, onde dalla precedente eguaglianza si ha:

$$p = \frac{P}{P'},$$

d'onde risulta che *prendendo per unità di peso specifico quello dell'acqua, il peso specifico di un corpo qualunque è dato dal quoziente del suo peso* P *a quello* P′ *di un pari volume d'acqua.*

7. Direzione della gravità. — La gravità è diretta (prossimamente) verso il centro della terra, non già perchè risieda in quest'unico punto ma perchè le attrazioni di tutti i punti del globo terrestre su di un corpo esterno producono lo stesso effetto di un'attrazione unica avente una direzione mediana fra quelle la quale, per ragione di simmetria, è diretta verso il centro.

Si indica la direzione della gravità mediante uno stromento semplicissimo detto *filo a piombo* (fig. 12), il quale consiste in un filo, ad un capo del quale è attaccato un peso (M). Il filo sospeso per l'altro capo si distende nella direzione in cui è tirato dal peso, e indica così la direzione della forza che ne è la causa, cioè della gravità.

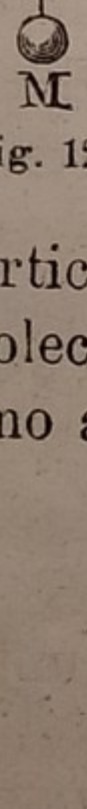


Fig. 12.

Codesto stromento serve specialmente nella costruzione degli edifizi, ove occorre tenere conto della direzione della gravità per la stabilità dei medesimi.

La direzione della gravità dicesi *verticale*. Una retta od un piano perpendicolare ad una retta verticale dicesi *orizzontale*.

La direzione verticale a ciascun polo fa angolo retto con la direzione verticale all'equatore; ma le direzioni verticali di punti poco lontani l'uno dall'altro, come sono le molecole di un corpo, comprendono così piccoli angoli, che non sono apprezzabili, perciò si possono considerare come parallele.

§ 16. Rappresentazione grafica delle forze.

1. Trazione o pressione che esercitano le forze. — Per muovere una tavola noi esercitiamo sulla medesima una trazione o pressione. Parimenti una locomotiva muove un convoglio tirandolo o spingendolo, e il vapore stesso muove la locomotiva esercitando una pressione sullo stantuffo nel cilindro. Quando una palla ne muove un'altra sul bigliardo esercita sulla medesima una pressione, e così pure la stecca del giuocatore muove le palle mediante un urto e quindi una pressione.

In generale le forze la cui azione è a noi percettibile, come nei casi ora indicati, muovono i corpi mediante pressione o tra

zione, la quale si esercita direttamente sopra uno o più punti del corpo e si trasmette agli altri mediante la coesione.

Ora siccome ogni trazione o pressione può essere prodotta mediante un peso, perciò si misura la pressione o trazione delle forze mediante pesi, cioè mediante il numero dei chilogrammi necessari per produrre lo stesso effetto.

Per es., la trazione necessaria per muovere una tavola si può misurare in chilogrammi, attaccando alla medesima una fune, facendo passare questa su una carrucola, e poi appendendo all'altro capo della fune il numero dei chilogrammi necessari per produrre il movimento della tavola. Così pure la forza necessaria per strappare un filo si può misurare in *kg.*, attaccando al medesimo il numero di questi necessario per produrre tale effetto, ecc.

2. Dinamometri. — E per maggiore comodità, per misurare le forze in chilogrammi, invece di questi si usano strumenti detti *dinamometri*.

Essi sono fondati sulla deformazione che subiscono le lamine o fili metallici sotto l'azione di una forza traente o premente.

Se si nota la deformazione prodotta nella lamina da 1, 2, 3, ecc. chilogr., ogniqualvolta una forza qualunque produce una data deformazione si conosce subito il numero dei chilogrammi di pressione o trazione che essa ha esercitato.

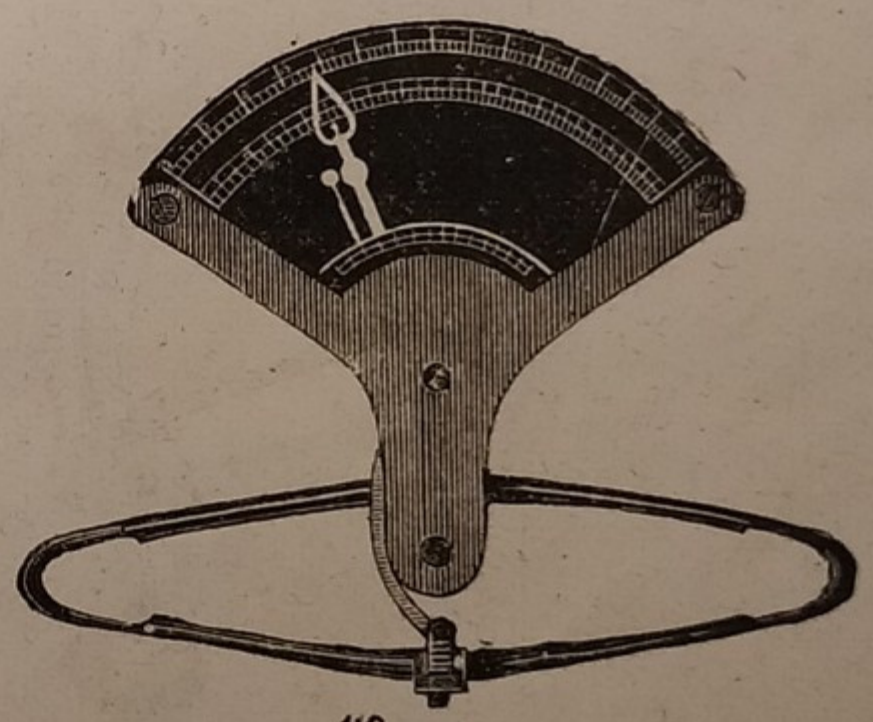


Fig. 13.

Si costruiscono dinamometri di diverse forme. Uno dei più usati è quello di Régnier (fig. 13). Esso consta: di una lamina di acciaio incurvata in forma ovale la quale si può, o stirare nel senso del maggior diametro della curva mediante appositi manubrii e serve allora a misurare le forze traenti, o premere nel senso del minor diametro della curva e così si misurano le forze prementi; alla molla è unito un quadrante con due graduazioni, una interna per la pressione, e l'altra esterna per la trazione, espresse in chilogrammi; infine sul quadrante è scorrevole un indice che viene spostato mediante un braccio dalla molla nella

sua deformazione, e che rimane al posto in cui venne portato, per indicare stabilmente la pressione o trazione esercitata.

La graduazione si fa empiricamente, facendo agire dei pesi come forza traente o premente, e notando sul quadrante il punto cui arriva l'indice per l'azione dei medesimi. Quindi se una forza traente o premente fa muovere l'indice fino ad un certo punto, il numero dei *kg.* ivi notato indica la grandezza della forza in *kg.* Per es., si può determinare in *kg.* la trazione necessaria per muovere una tavola, tirando questa mediante l'apparecchio.

Gli uomini possono esercitare forze traenti o prementi di circa 50 *kg.*, i cavalli da 200 a 300 *kg.*

Altra forma di dinamometro è quella che dicesi *stadera a molla* (fig. 14). In esso la lamina elastica è piegata a V, e quando si fa agire una pressione o trazione, questa ne diminuisce l'angolo.

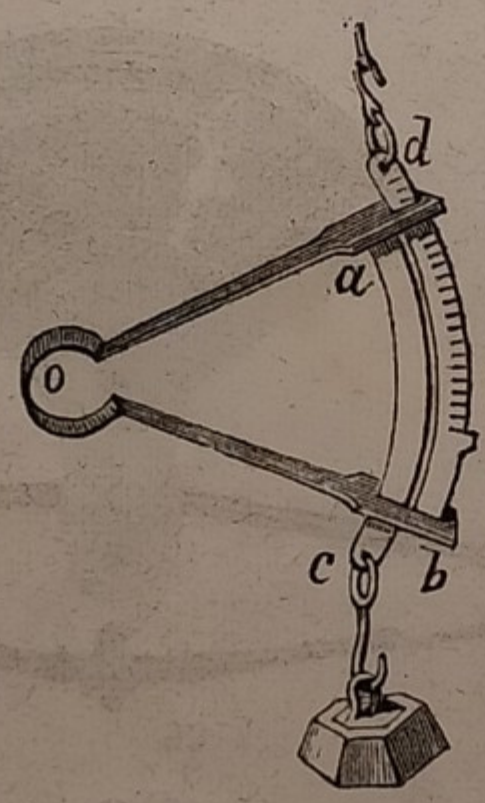


Fig. 14.

Fig. 15.

Infine la molla può essere piegata ad elica (fig. 15). Quando si fa agire una trazione, le sue spire vengono più o meno avvicinate secondo la grandezza di quella.

Certi *pesa lettere* sono appunto piccoli dinamometri a molla spirale.

Però i dinamometri fondati sull'elasticità, la quale può subire modificazioni col tempo, debbono essere ogni tanto controllati per essere sicuri dell'esattezza delle loro indicazioni.

3. Elementi di una forza. — Misurando una forza in *kg.* si determina la grandezza della sua trazione o pressione, la quale si dice *intensità*, e costituisce uno degli elementi che determinano una forza.

Altri due elementi necessari per determinare una forza sono la sua *direzione* e il suo *punto di applicazione*, cioè il punto del corpo su cui essa agisce.

4. Rappresentazione grafica delle forze. — Queste tre condizioni che determinano una forza si possono rappresentare graficamente mediante una linea retta, che indica:

1° il *punto di applicazione*, mediante il suo punto di partenza;

2° la *direzione della forza*, mediante la direzione della retta nello spazio, e una freccia che mostra il verso in cui agisce la forza sulla direzione della retta;

3° l'*intensità della forza*, mediante la lunghezza della retta, la quale si prende di tante unità lineari quante sono le unità di forza costituenti quella rappresentata.

Per es., per rappresentare una forza 4 che agisce nella direzione AX (fig. 19), si porta su questa retta una lunghezza AP = 4 unità lineari; e per rappresentare una forza 3 che agisce secondo AY, si porta su questa retta una lunghezza AQ = 3 unità lineari.

Così le forze vengono rappresentate geometricamente e sono possibili sulle medesime i calcoli e le costruzioni della geometria.

§ 17. Composizione e scomposizione delle forze.

1. Risultante e componenti. — Quando più forze agiscono su d'un corpo in direzioni qualunque possono avvenire due casi. O le forze agiscono in modo da non alterare lo stato di quiete o di moto uniforme del corpo, e allora, come si è già notato (pag. 28), si dice che si fanno equilibrio. O le forze producono il moto del corpo, e allora questo si muove in una certa direzione e con una certa velocità, come se fosse sotto l'azione di una forza unica che producesse lo stesso effetto di quelle.

La forza che produce su un corpo lo stesso effetto di più altre forze si dice la loro risultante; e queste rispetto a quella si dicono le componenti.

Nel caso dell'equilibrio statico (pag. 28), è chiaro che una qualunque delle componenti pareggia l'effetto delle altre, ed è perciò eguale e contraria alla loro risultante.

2. Composizione e scomposizione delle forze. — Quando si determina la risultante di due o più forze si dice che si fa la *composizione* delle medesime.

Viceversa se all'azione di una forza si sostituisce quella di due o più altre, in modo che producano lo stesso effetto di quella, si *scompone* una forza nelle sue componenti.

3. Corpi rigidi. — Nella composizione o scomposizione delle forze si suppongono i corpi *rigidi*. Chiamasi *corpo o sistema rigido un complesso di punti riuniti fra loro in modo invariabile.*

Veramente i corpi della natura non sono propriamente rigidi, e tutti si deformano più o meno sotto l'azione delle forze. Di tali deformazioni deve tener conto l'ingegnere nell'uso dei materiali nella costruzione degli edifizi, delle macchine, ecc.

Ma nello studio elementare dell'azione delle forze sui corpi si fa astrazione delle dette deformazioni e si considerano quelli come rigidi.

4. Trasposizione del punto d'applicazione di una forza. — Sia F (fig. 16) una forza qualunque applicata ad un punto A

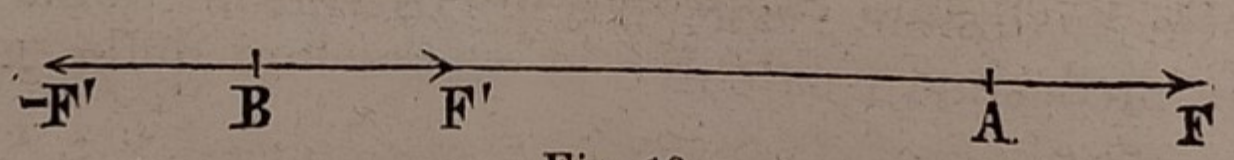


Fig. 16.

di un corpo rigido. Prendiamo nella direzione della forza un secondo punto B invariabilmente congiunto col primo, e supponiamo applicate in esso, nella direzione della retta AB, due forze F′, — F′ eguali alla forza F, e contrarie fra loro; queste si faranno equilibrio e quindi il sistema delle 3 forze sarà equivalente alla forza primitiva F. Ma per altra parte questo sistema equivale anche alla sola forza F′, perchè le due forze F, — F′, siccome eguali e contrarie, si fanno pure equilibrio. Dunque il sistema delle 3 forze, F, F′, — F′ equivale alla sola forza F′, la quale non è che la forza F applicata al punto B.

Dunque: *il punto di applicazione di una forza può essere trasportato in un altro qualunque della sua direzione purchè congiunto invariabilmente col primo.*

Il che risulta anche evidente osservando che, se il nuovo punto di applicazione della forza è invariabilmente connesso col primo, l'azione di quella sul secondo punto, essendo sempre la stessa in intensità e direzione, si trasmetterà tutta quanta al primo, e l'effetto sarà evidentemente lo stesso.

Se, per es., una forza tira un corpo mediante una fune, il suo effetto sarà sempre lo stesso, qualunque sia il suo punto di applicazione sulla fune, purchè questi punti di applicazione siano invariabilmente connessi fra loro, cioè purchè la fune sia resistente, si faccia astrazione del suo peso. Lo stesso avverrebbe se la forza spingesse il corpo mediante una verga rigida.

5. Diversi casi da distinguersi nella composizione e scomposizione delle forze. — Infine nello studio della composizione e scomposizione delle forze si distinguono 3 casi principali, secondochè le forze agiscono secondo la stessa linea retta, ovvero secondo rette concorrenti, cioè le cui direzioni concorrono in un punto, ovvero secondo rette parallele.

§ 18. Risultante di due o più forze aventi la stessa linea di azione.

1. Risultante di due o più forze che agiscono secondo la stessa retta nello stesso verso. — *La risultante di due o più forze che agiscono secondo la stessa retta e nello stesso verso è evidentemente eguale alla somma delle componenti ed ha la stessa direzione di queste.*

Così se un cavallo puo esercitare una trazione 7 volte maggiore di quella di un uomo, la sua forza può rappresentare la risultante delle forze di 7 uomini, traenti nello stesso senso.

Viceversa una forza unica può essere sostituita dall'azione di più forze dirette secondo la stessa linea retta. Così alla forza traente di una locomotiva si può sostituire quella di più cavalli.

2. Risultante di due o più forze che agiscono secondo la stessa retta ma in verso contrario. — Invece, *la risultante di due forze che agiscono secondo la stessa retta ma in verso contrario è uguale alla differenza delle componenti ed è diretta nel verso della maggiore.*

Così se due persone tirano una fune in verso contrario, la risultante è eguale alla differenza delle loro trazioni, ed è diretta nel verso della maggiore.

Infine la risultante di più forze che agiscono secondo la stessa linea retta, ma le une in un verso, le altre in verso contrario, è uguale alla differenza fra la somma delle une e quella delle altre, ed è diretta nel verso della somma maggiore.

Se ne ha esempio nel giuoco del tiro alla fune che si fa nelle palestre ginnastiche.

3. Somma algebrica di più forze. — Se si distinguono col segno + le forze che agiscono in una direzione, e col segno — quelle che agiscono in opposta direzione, allora si possono comprendere tutti i casi nel seguente teorema: *La risultante di due o più forze che hanno la stessa linea di azione è uguale alla somma algebrica delle componenti.*

§ 19. Risultante di due o più forze concorrenti.

1. Forze concorrenti. — Quando una barca deve attraversare un fiume essa si trova sotto l'azione di due forze ad angolo, o *concorrenti*, cioè le cui direzioni concorrono in un punto, e le quali sono: la forza della corrente, e quella del rematore che spinge la barca in direzione trasversale alla corrente. Ora tutti sanno che essa sotto l'azione di quelle due forze non segue la direzione nè dell'una nè dell'altra, ma una direzione intermedia, come se fosse sotto l'azione di una forza intermedia.

La direzione e grandezza di questa forza è determinata dalla seguente regola.

2. Parallelogrammo delle forze. — Sia AX (fig. 17) la direzione della corrente, e AY quella della spinta del rematore. Su AX si prenda una lunghezza AB proporzionale alla forza della

corrente, e su AY una lunghezza AC proporzionale alla forza del rematore. Si costruisca il parallelogramma ABDC, e si tiri la diagonale AD, questa rappresenta in grandezza e direzione la forza che da sola produrrebbe lo stesso effetto delle due forze AB, AC, cioè la loro risultante.

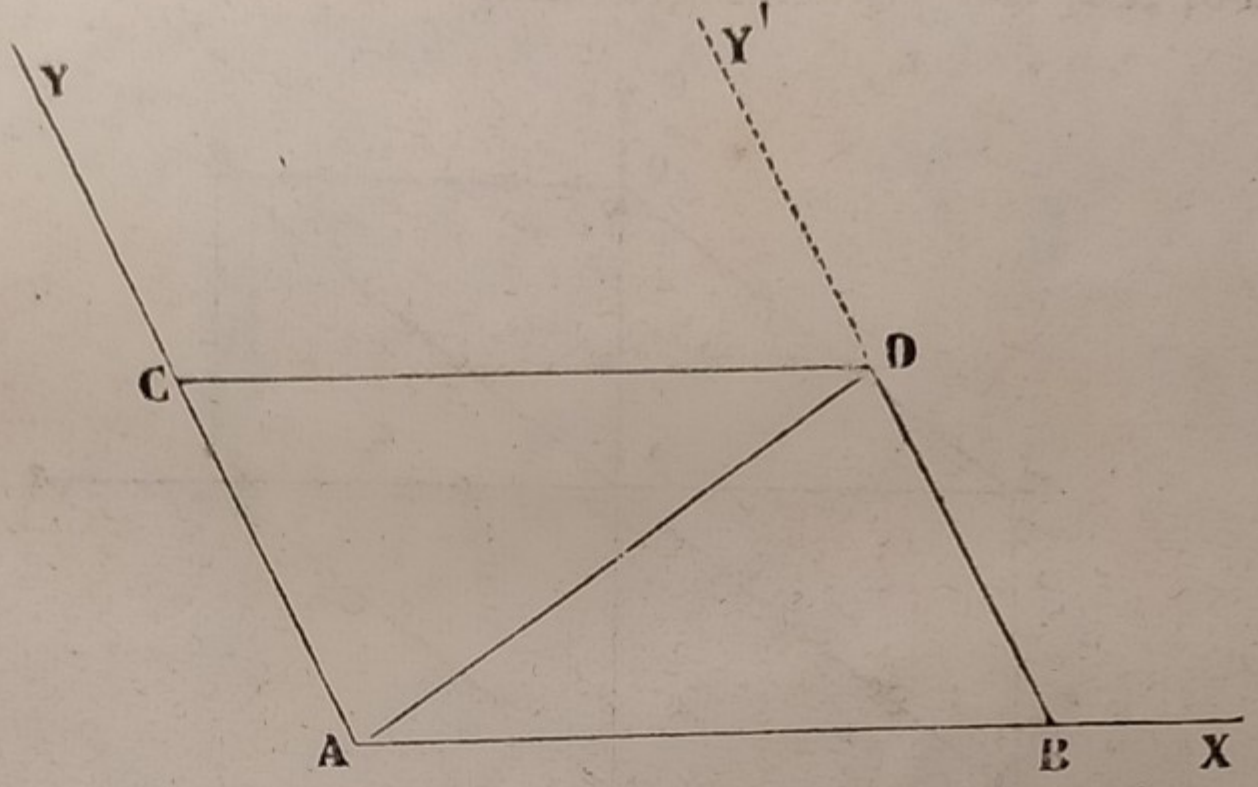


Fig. 17.

Quindi la seguente regola: *la risultante di due forze concorrenti è rappresentata in grandezza e direzione dalla diagonale del parallelogrammo costruito sulle rette che rappresentano le due forze componenti.*

Tale proposizione si dice: *la regola del parallelogrammo delle forze.*

Essa si può dimostrare con considerazioni matematiche, ma nello studio elementare conviene limitarsi alla prova sperimentale che si dà nella seguente maniera.

3. Prova sperimentale. — Ad un medesimo punto si attaccano tre fili, ciascuno dei quali si fa passare sopra una carrucolina fissata all'orlo di una tavoletta circolare (fig. 18). Indi si appendono a due fili (A p, A r) due pesi (m, n) e si segnano nella direzione dei fili, due rette (A c, A b) le cui lunghezze sieno proporzionali ai pesi. Si costruisce su quelle il parallelogramma (A b d c), si tira la dia-

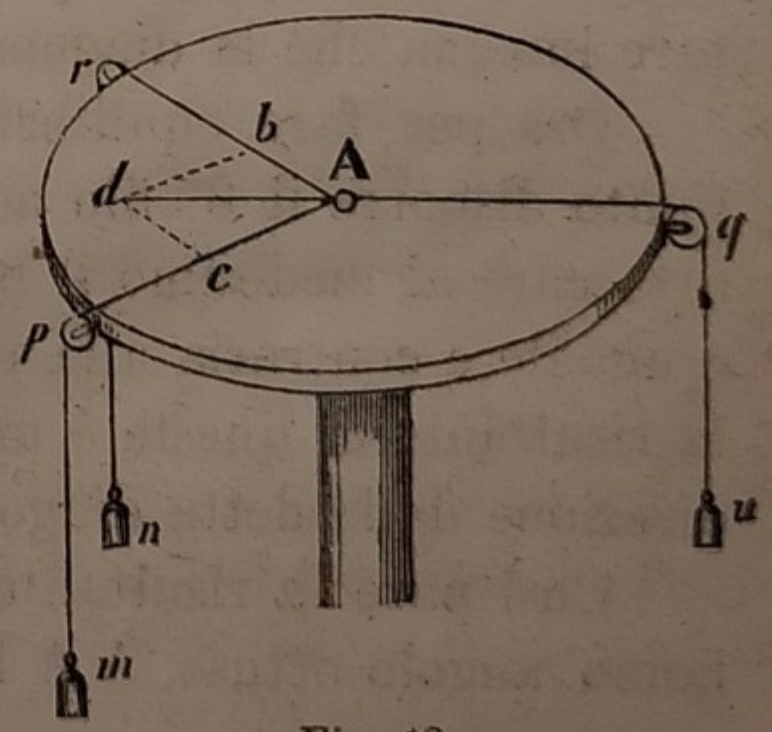


Fig. 18.

gonale (A d), se ne misura la lunghezza, e si verifica che per fare equilibrio alle forze traenti dei due pesi, bisogna disporre il 3° filo (A q) nella direzione opposta alla diagonale (A d) e attaccare al medesimo un peso (u), che abbia cogli altri due pesi (m, n) lo stesso rapporto di grandezza che la diagonale (A d) ha coi lati (A b, A c) del parallelogramma.

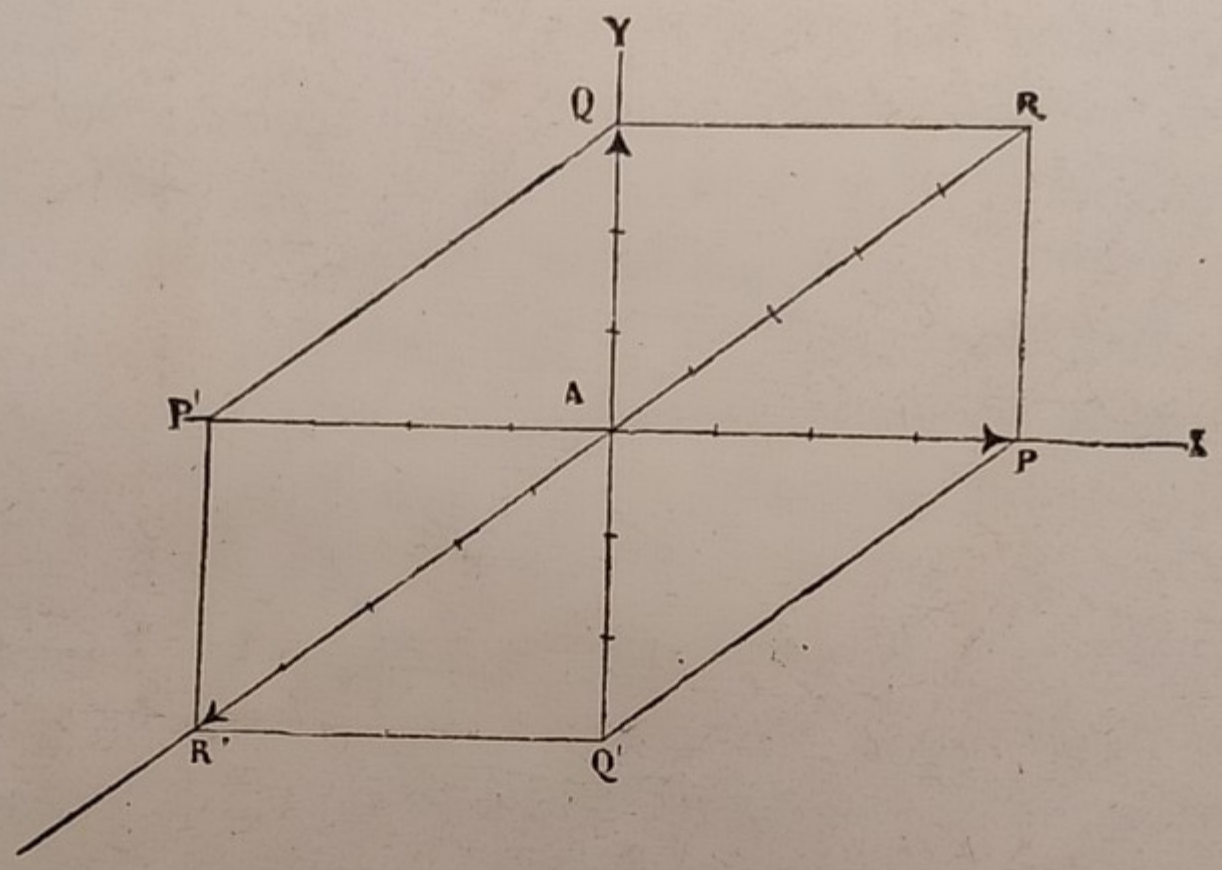


Fig. 19.

Per es., se i due fili (A p, A r) si dispongono ad angolo retto nelle direzioni A X, A Y (fig. 19), e si appendono ai medesimi i pesi 4, 3, quindi si segnano sulle loro direzioni le lunghezze A P = 4, A Q = 3, e si costruisce su tali rette un parallelogrammo, che in tal caso è un rettangolo, la geometria elementare insegna che la diagonale ha una lunghezza A R = 5 (*).

Ora per fare equilibrio alle dette forze traenti, si deve appunto disporre il 3° filo nella direzione A R′ contraria ad A R, e attaccare al medesimo il peso 5. Il che dimostra che tale forza è uguale e contraria alla risultante delle altre due, e quindi che la risultante di queste è una forza rappresentata in grandezza e direzione dalla detta diagonale.

Così pure la risultante delle forze A Q = 3, A R′ = 5, che fanno angolo ottuso, è A P′ = 4, perchè ad esse fa equilibrio la

---

(*) Perchè nel triangolo rettangolo A P R, pel teorema di Pitagora, si ha l'uguaglianza:

$$(A\,R)^2 = (A\,P)^2 + (P\,R)^2,$$

ovvero

$$A\,R^2 = 4^2 + 3^2 = 16 + 9 = 25.$$

e quindi

$$A\,R = 5.$$

forza A P = 4, eguale e contraria; e la risultante delle due forze A P = 4, A R′ = 5 che fanno angolo ancora più ottuso, è A Q′ = 3, perchè ad esse fa equilibrio la forza A Q = 3, eguale e contraria.

Se si cambia una delle forze, ovvero uno degli angoli che esse formano, non vi è più equilibrio.

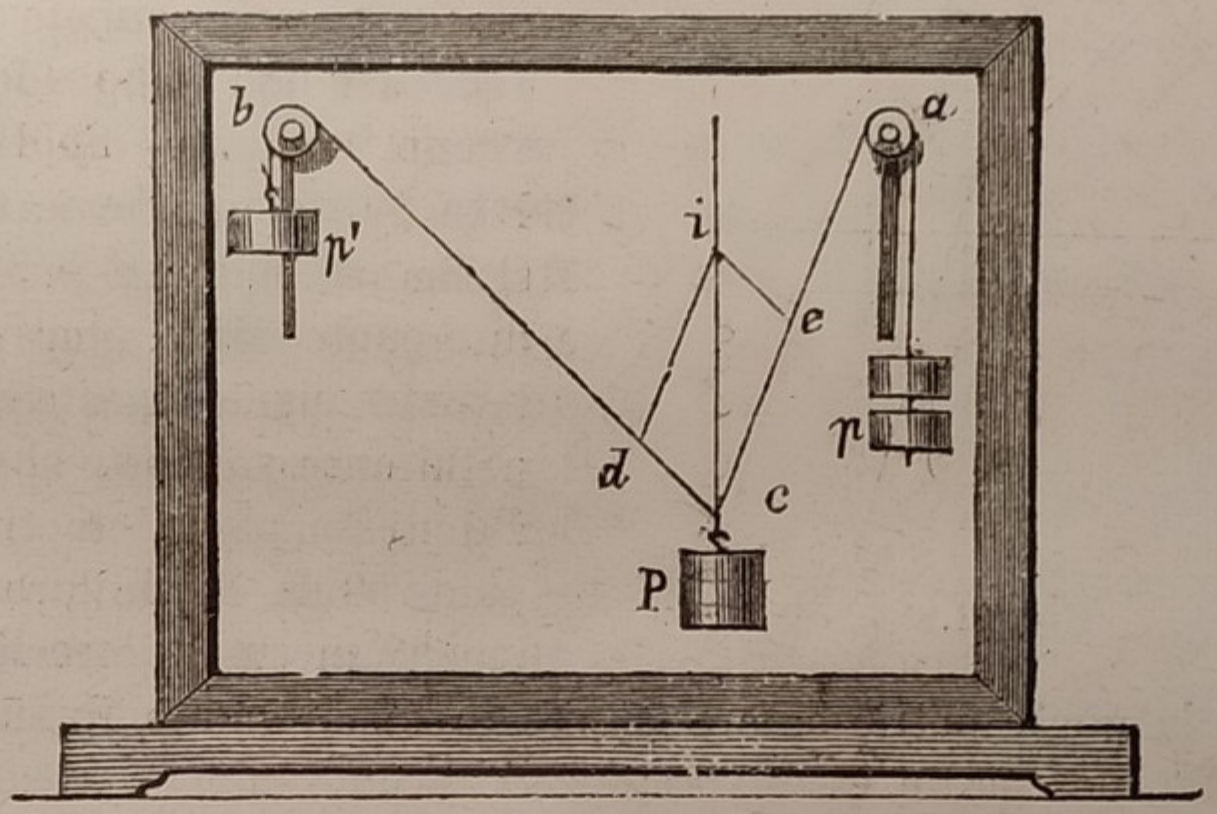


Fig. 20.

Invece dell'apparecchio rappresentato dalla figura precedente, si usa anche quello rappresentato dalla figura 20, in cui la tavoletta è verticale, e bastano 2 carrucole.

4. Corollarii. — Dal teorema del parallelogrammo delle forze conseguono i seguenti importanti corollari.

1° *La risultante di due forze concorrenti cresce col diminuire dell'angolo che fanno le loro direzioni.*

Infatti quanto è minore l'angolo fatto dalle direzioni delle forze componenti, tanto più lunga diviene la diagonale del parallelogrammo, il che significa che maggiore è l'effetto esercitato sul corpo dalle forze componenti. Quando perciò a una corda principale vengono attaccate parecchie corde secondarie tratte da uomini, siccome nella berta o battipalo, e nella trazione dei battelli, debbono gli operai stare al più possibile vicini l'uno all'altro.

2° *Quando l'angolo delle componenti è nullo, la risultante è eguale alla loro somma*, perchè allora le componenti agiscono secondo la stessa linea e nello stesso verso, come si è già stabilito (§ 18).

3° *Se l'angolo delle due forze concorrenti è di* 180°, *cioè eguale a due retti, la risultante è eguale alla loro differenza*, perchè le componenti agiscono secondo la stessa linea, ma in verso contrario (§ 18).

4° *La risultante di due forze che fanno un angolo è sempre minore della loro somma e maggiore della loro differenza, perchè la diagonale di*

un parallelogrammo è sempre minore della somma dei lati e maggiore della loro differenza.

5° *Infine, la risultante di due forze concorrenti eguali è precisamente diretta secondo la bisettrice dell'angolo che formano le loro direzioni; invece la risultante di due forze concorrenti disuguali è sempre più vicina alla componente maggiore.*

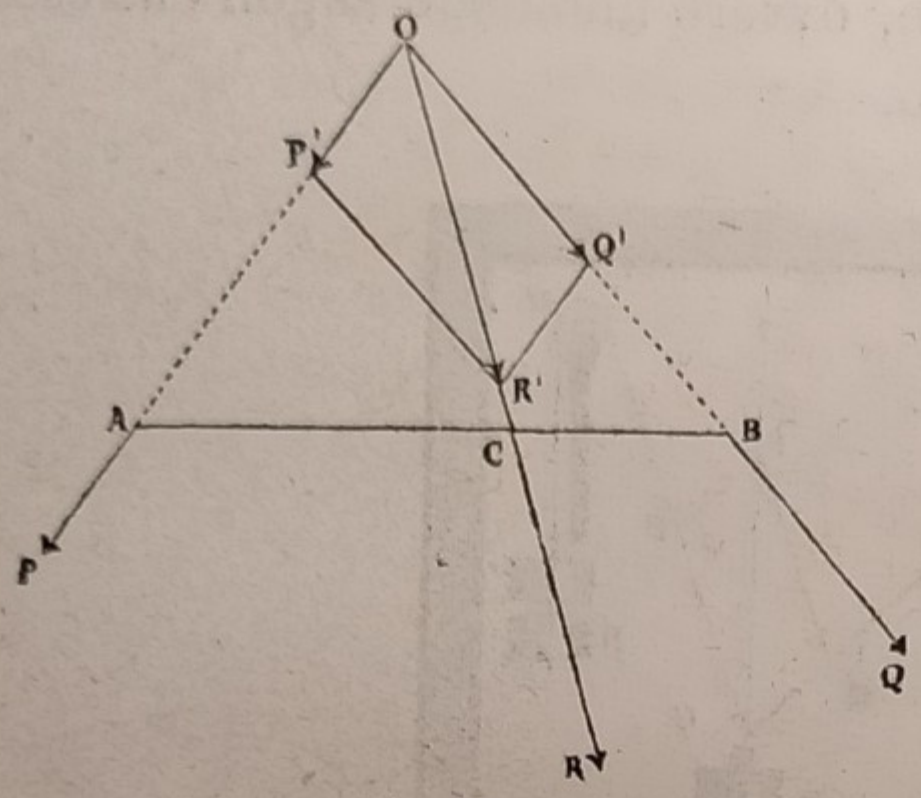


Fig. 21.

5. Caso in cui le forze concorrenti non sono applicate allo stesso punto. — Se le forze A P, B Q (fig. 21) non sono applicate allo stesso punto, ma a punti diversi di un corpo rigido, per determinare la risultante, supposto che agiscano nello stesso piano, si trasportano i loro punti di applicazione nel punto O in cui le loro direzioni si incontrano, e si determina la risultante O R′, la quale potrà essere applicata in un punto qualunque della sua direzione, per es. in C.

6. Risultante di più forze concorrenti applicate allo stesso punto. — Sieno A P, A Q, A S, A T (fig. 22), più forze applicate ad uno stesso punto A. Per trovarne la risultante basta evidentemente comporre dapprima due forze qualunque A P, A Q, costruendo il parallelogramma sulle rette che le rappresentano. Anzi non è neppure necessario costruire l'intero parallelogramma, ma basta dal punto P tirare una retta P B eguale e parallela ad A Q, e poi tirare A B che ne rappresenta la risultante. Indi si cerca la risultante di A B e della 3ª forza A S, tirando da B una retta B C eguale e parallela ad A S, e poi A C che rappresenterà la risultante delle 2 forze A B, A S, e quindi anche delle 3 forze A P, A Q, A S.

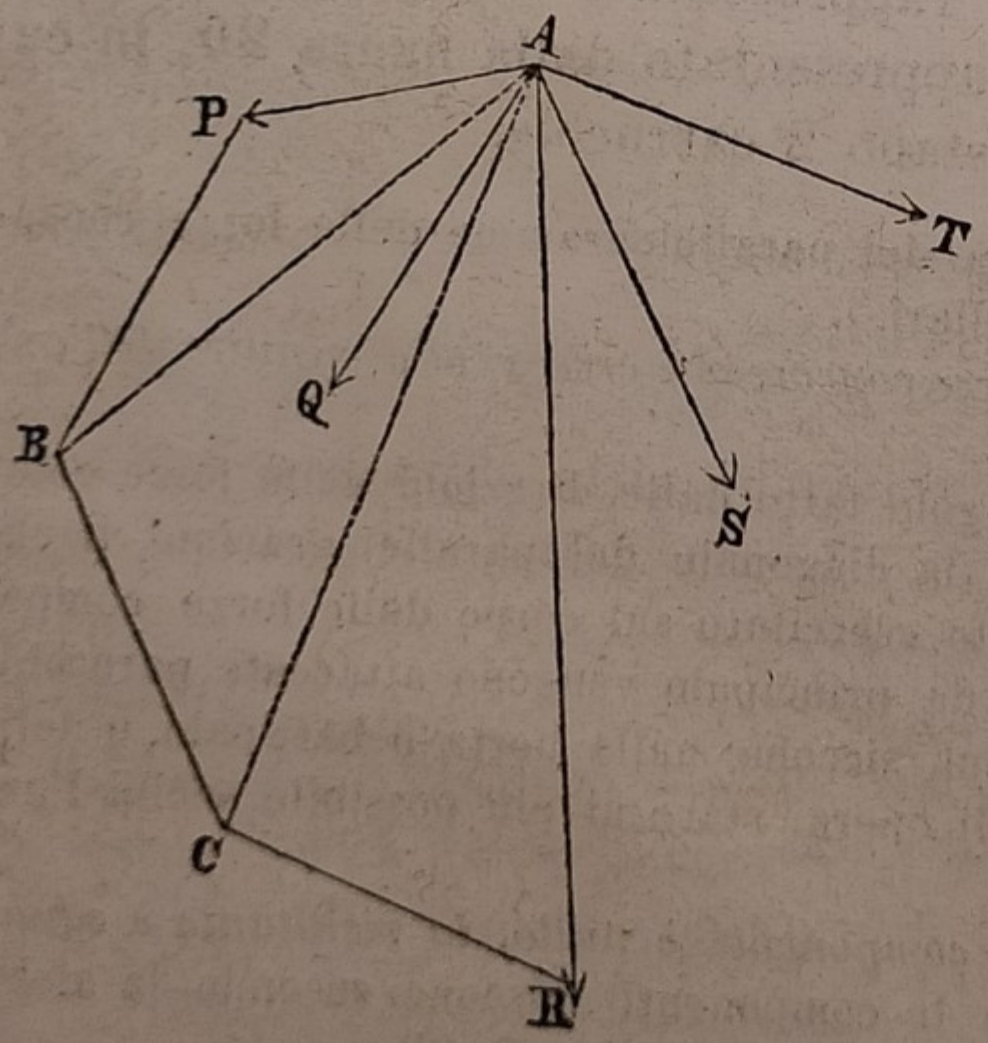


Fig. 22.

Infine da C si tira C R eguale e parallela alla 4ª forza rappresentata da A T, e poi A R che sarà la risultante delle 4 forze.

Dunque per trovare la risultante di un numero qualunque di forze applicate ad uno stesso punto si costruisce un poligono, di cui un lato (A P) è una delle rette che rappresentano una delle forze, e gli altri (P B, B C, C R) sono rette eguali e parallele a quelle che rappresentano le altre forze.

La retta (A R) che chiude il poligono rappresenta la risultante finale in direzione e grandezza.

Questa costruzione vien detta *del poligono delle forze.*

E se il punto R coincidesse con A, cioè la retta A R fosse eguale a zero, ciò significherebbe che la risultante è nulla, cioè che le forze si fanno equilibrio fra loro.

In questo caso ciascuna delle forze è eguale e contraria alla risultante di tutte le altre. Per es., se più persone che tirano una tavola non la muovono, è segno che le loro forze si fanno equilibrio, e quindi che ciascuna forza è uguale e contraria alla risultante di tutte le altre.

Se tutte le componenti sono in un medesimo piano, il poligono, e quindi anche la risultante, si trova in quel piano.

Se le componenti non sono tutte in un medesimo piano, il poligono è *gobbo*, cioè non ha tutti i lati giacenti in un medesimo piano.

7. Condizione per l'equilibrio di un punto sollecitato da più forze. — Dalle cose dette risulta che la condizione per l'equilibrio di un punto sollecitato da più forze si è che la risultante di queste sia nulla, e quindi che ciascuna forza sia eguale e contraria alla risultante di tutte le altre.

Perciò, dato un sistema di forze applicate ad uno stesso punto, per ridurlo all'equilibrio basta cercare la risultante di tutte le forze, ed applicare una forza eguale e contraria alla medesima.

8. Scomposizione di una forza in altre concorrenti. — All'azione di una forza si può sostituire quella di due o più altre concorrenti.

Il caso che occorre più di frequente per le forze concorrenti è quello in cui è data la direzione delle forze componenti, e deve solo essere determinata la loro grandezza. Questo problema è evidentemente l'inverso di quello del parallelogrammo delle forze.

Se, ad esempio, si vogliono determinare le grandezze delle forze che agendo nelle direzioni Mp Mq (fig. 23) produrrebbero l'effetto della forza rappresentata in grandezza e direzione dalla MR, basta evidentemente dal punto R tirare RQ, RP rispettivamente parallele alle direzioni Mp, Mq; si ottiene così il parallelogrammo MPRQ, i cui lati MP, MQ rappresentano le grandezze delle forze che sono le componenti della forza MR, nelle direzioni Mp, Mq.

In tal caso ciascuna delle componenti si chiama la *parte risoluta* della forza data in quella direzione; e quando le direzioni delle componenti fanno angolo retto fra loro, le loro grandezze sono rappresentate dalle proiezioni della forza data sulle loro direzioni.

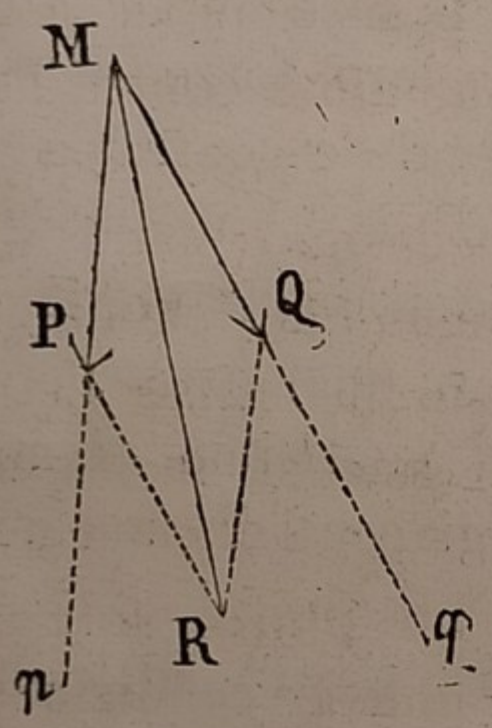


Fig. 23.

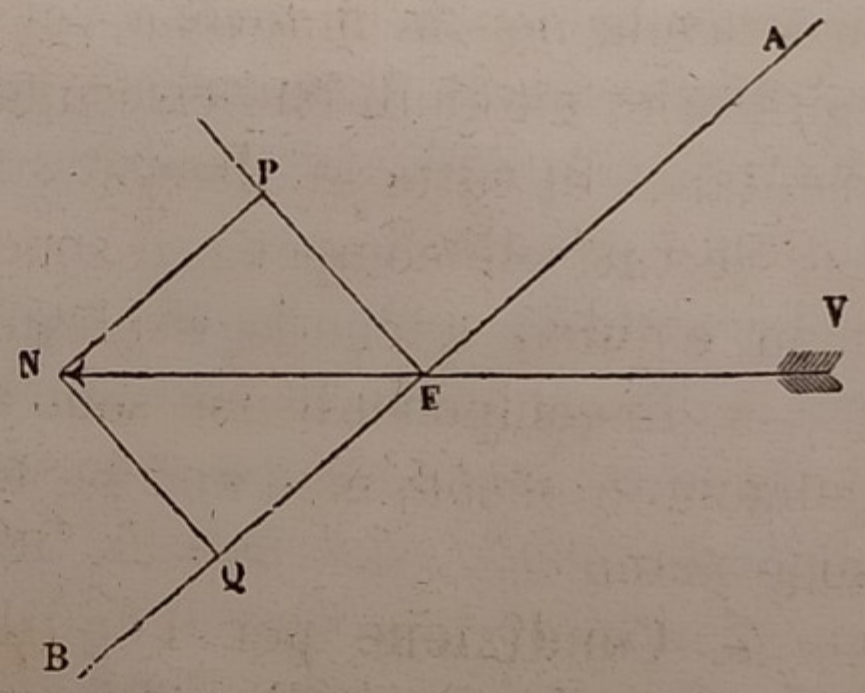


Fig. 24.

9. Prove sperimentali. — Molti sono gli esempî di tale scomposizione d'una forza. Così il drago, o aquilone, è sostenuto in aria da una componente della forza orizzontale del vento. Infatti, per farlo salire, devesi attaccare alla sua faccia inferiore la funicella, in guisa che esso stia nell'aria in posizione inclinata e non orizzontale. Allora se AB (fig. 24) rappresenta l'asse del drago, VEN la direzione orizzontale del vento, EN la forza del medesimo, questa produce lo stesso effetto delle due componenti, EP perpendicolare, EQ parallela alla superficie dell'aquilone, le quali si ottengono conducendo da N le parallele NP, NQ alle due direzioni indicate.

Ora la componente perpendicolare EP è quella che sostiene e spinge l'aquilone in alto, mentre la componente parallela EQ evidentemente non produce alcun effetto sul medesimo.

Se l'aria è in moto, cioè se spira vento all'altezza a cui si trova l'aquilone, esso rimane sospeso per l'aria che continuamente lo urta, senza che

sia necessario muoverlo; invece, se l'aria è in quiete allora devesi muovere il drago contro di essa, perchè ne risulti l'urto o la pressione che deve sostenerlo e sollevarlo.

Per l'urto delle particelle aeree contro le alette inclinate, o meglio di queste contro quelle, si solleva pure a grande altezza nell'aria l'*elice volante*, costituito da una lastrina di metallo tagliata in forma di due alette inclinate, unite insieme, alle quali si comunica un rapido modo di rotazione mediante una funicella. Esso può considerarsi come costituito dalla riunione di due piccoli aquiloni, i quali pel moto di rotazione urtando l'aria colla loro faccia inferiore sono costretti ambidue a salire in linea spirale.

Quindi si intende pure come l'elice applicata ad un globo aerostatico, ovvero ad una nave nell'acqua, quando venga fatta girare da una forza motrice, faccia procedere innanzi il corpo cui è congiunta; sul quale principio è fondato l'uso dell'elice come propulsore.

La vela di una nave è generalmente obliqua alla direzione del vento, perciò questo non preme la vela con tutta la sua forza, ma solo con la componente perpendicolare alla vela. Siccome poi la componente perpendicolare alla vela non ha in generale la direzione della lunghezza della nave, secondo la quale essa deve muoversi, perciò la componente efficace a premere la vela non è ancora totalmente efficace a spingere innanzi la nave, ma lo è solo una terza componente, la quale si otterrebbe decomponendo la componente perpendicolare alla vela in altre due, una parallela alla lunghezza della nave e l'altra perpendicolare. La prima è quella che spinge innanzi la nave. Quindi con opportuna disposizione della vela lo stesso vento può spingere due barche in direzioni opposte.

Per la scomposizione delle forze gira pure il molinello di carta dei ragazzi, il quale si fa tagliando un pezzo di carta quadrata secondo le due diagonali, quasi fino al centro, e poi infilzando il centro e gli angoli dimezzati, alternativamente, uno sì e l'altro no, in uno spillo. Risulta così un molinello con quattro ali incurvate, il quale viene messo in rotazione, o da una corrente d'aria moventesi contro il medesimo in riposo, ovvero col moto progressivo del molinello stesso contro l'aria, se essa è in riposo.

Anche qui la rotazione è solo prodotta dalla componente perpendicolare all'asse.

Se si pone tale molinello, o altro consimile, a conveniente altezza sopra una fiamma, esso gira per la corrente di aria calda che si solleva dalla medesima, la quale corrente urta le alette obliquamente.

Il ventilatore delle cucine, un piccolo molinello di latta colle alette inclinate, gira pure per la pressione obliqua che esercita sulle sue alette la corrente d'aria che passa dall' interno all'esterno, o viceversa.

Se una barca viene fatta muovere a ritroso della corrente di un fiume mediante funi tirate da persone che camminano sulla riva, dovendo essa muoversi in direzione diversa da quella secondo la quale agisce la forza, questa può solo produrre effetto mediante la sua componente che ha la direzione del movimento della barca, mentre l'altra componente perpendicolare

alla spiaggia la spinge verso questa, e per impedire che essa le vada contro si dispone il timone verso la corrente in modo che questa eserciti sul medesimo una pressione che tende a rivolgere la punta della barca verso la corrente stessa.

In generale, quando un corpo non può muoversi nella direzione secondo cui agisce sul medesimo una forza, ma solo in un'altra direzione, il suo movimento è solo effettuato dalla componente della forza che agisce secondo tale direzione; viceversa, una forza può agire in una direzione diversa dalla propria, ma solo con la sua componente che ha quella direzione.

Nel camminare, noi portiamo un piede innanzi e lo appoggiamo sul suolo tanto più obliquamente quanto più lungo è il passo. La pressione obliqua che così esercitiamo sul suolo agisce come due componenti, una perpendicolare distrutta dalla resistenza del suolo, l'altra parallela ordinariamente distrutta dall'attrito; ma quando questo è assai piccolo, come avviene sul ghiaccio, allora per la componente parallela si arrischia continuamente di sdrucciolare, e per diminuire tale pericolo procuriamo di diminuire quella componente posando la gamba meno obliquamente possibile sul suolo, il che si ottiene facendo i passi corti.

§ 20. Risultante di due o più forze parallele e cospiranti.

1. Forze parallele e cospiranti. — Chiamansi *forze parallele e cospiranti* quelle le cui direzioni sono parallele e agiscono nello stesso verso.

Gli animali attaccati per paia ai carri, e le ruote a palette dei battelli a vapore, sono esempi di forze parallele.

2. Determinazione sperimentale delle proprietà della risultante di due forze parallele e cospiranti. — Dapprima notisi che due pesi non guari lontani, si possono considerare come due forze traenti o prementi parallele, perchè dirette verso un punto, cioè il centro della terra, che è alla distanza di più di 6 milioni di metri, epperciò l'angolo che fanno è trascurabile.

Ora se ai capi di una bacchetta leggiera si attaccano due fili che si fanno passare su due piccole carrucole fissate superiormente ad una tavoletta verticale (fig. 25) e ai fili si attaccano due anellini, i quali fanno equilibrio al peso della verghetta, questa resterà sospesa, e, fatta astrazione dal piccolo attrito, essa sarà li-

bera affatto di muoversi, come se non fosse soggetta all'azione della gravità.

Ciò posto, nella ricerca sperimentale delle proprietà della risultante di due forze parallele e cospiranti si possono distinguere due casi principali.

1° Caso. *Forze parallele eguali.* Se si fa dapprima tirare la verga in alto ai due capi da due pesi eguali fra loro, per es., di 1 *ettogr.* ciascuno, si verifica che per fare equilibrio a quelle due forze traenti verticali dirette dal basso in alto, bisogna applicare alla verga una forza traente verticale diretta in basso, eguale alla somma delle medesime, e applicata nel suo punto di mezzo. Se la forza che tira la verga in basso è minore della somma delle componenti, essa si solleva; se è maggiore, si abbassa. E se non è applicata nel mezzo, ma è più vicina ad una delle componenti, la verga si solleva dalla parte della componente più lontana.

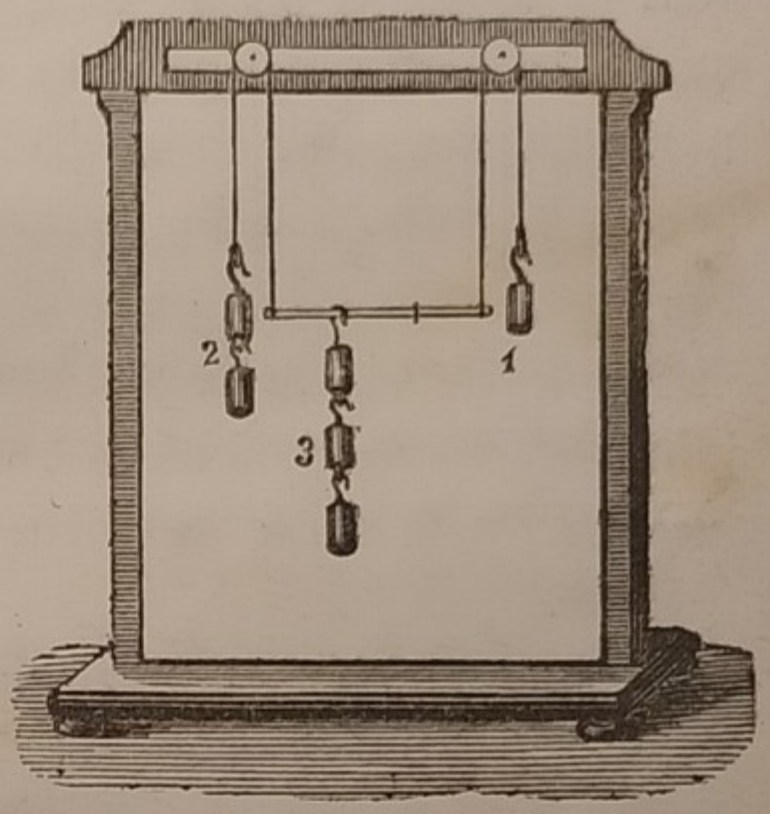


Fig. 25.

Ora se le due forze traenti verticali ed eguali sono equilibrate da una forza verticale diretta in senso contrario, eguale alla loro somma, ed applicata in un punto equidistante dai punti di applicazione delle componenti, si deve concludere che esse producono l'effetto d'una forza eguale e contraria a questa, e quindi che *la loro risultante*, cioè la forza unica capace di produrre lo stesso effetto sul corpo a cui sono applicate, è *una forza parallela alle medesime, cospirante, eguale alla loro somma e che agisce in un punto equidistante dai punti di applicazione delle componenti.*

2° Caso. *Forze parallele cospiranti diseguali.* — Se ora facciamo tirare la verga in alto ai due capi da due forze parallele diseguali, per es., dai pesi 1 e 2 *ettogr.*, troviamo che per fare equilibrio ad essi bisogna fare tirare la verga in basso da un peso sempre eguale alla somma, cioè $1 + 2 = 3$ *ettogr.*, ma applicato in un punto alla distanza 1 dalla forza 2, e alla di-

stanza 2 dalla forza 1 ; ovvero che di quanto una forza è maggiore dell'altra, di altrettanto il punto di applicazione della forza che fa equilibrio alle altre due deve essere più vicino alla forza maggiore e più lontano dalla minore. Se questa condizione non è soddisfatta non vi è equilibrio, ma la verga si abbassa dalla parte da cui la distanza è deficiente.

Ora se la forza $1 + 2 = 3$ applicata nel detto punto, e che tira la verga in basso, fa equilibrio alle forze 1 e 2 applicate ai due capi e che la tirano in alto, si deve concludere che essa ne pareggia l'effetto, epperciò che *questa equivale a quello di una forza parallela alle componenti e diretta nello stesso verso, applicata in un punto le cui distanze dai punti di applicazione delle componenti sono inversamente proporzionali alle loro intensità*, poichè per fare equilibrio alle medesime bisogna fare agire in senso contrario una forza che soddisfi a quelle condizioni.

Parimenti se le forze che tirano la verga in alto ai due capi sono 1 e 3 *ettogr.*, per fare equilibrio ad esse bisogna far tirare la verga in basso da una forza $3 + 1 = 4$ *ettogr.*, applicata in un punto alla distanza 1 dalla forza 3 e alla distanza 3 dalla forza 1 ; e analogamente in tutti i casi.

3. Enunciato delle proprietà della risultante delle due forze parallele e cospiranti. — Dalle cose dette consegue che: *la risultante di due forze parallele e cospiranti ha le seguenti proprietà.*

1° *è parallela e cospirante colle componenti;*

2° *è eguale alla loro somma ;*

3° *la sua direzione divide la congiungente dei punti di applicazione delle componenti in due segmenti inversamente proporzionali alle grandezze di queste.*

4. Risultante di più forze parallele e cospiranti. — Come si ottiene la risultante di più forze concorrenti cercando dapprima la risultante di due qualunque di esse, poi la risultante trovata e di una terza forza, così pure per trovare la risultante di più di due forze parallele e cospiranti basta trovare la risultante di due di esse, e poi la risultante di queste due e di una terza componente, ecc.

Così se AP = 1, BQ = 2, CS = 3 (fig. 26) sono tre forze parallele cospiranti, si troverà dapprima, nel modo or ora esposto, la risultante DR = 3 delle due forze AP, BQ, e quindi la risultante ER′ = 6 di DR = 3, e CS = 3.

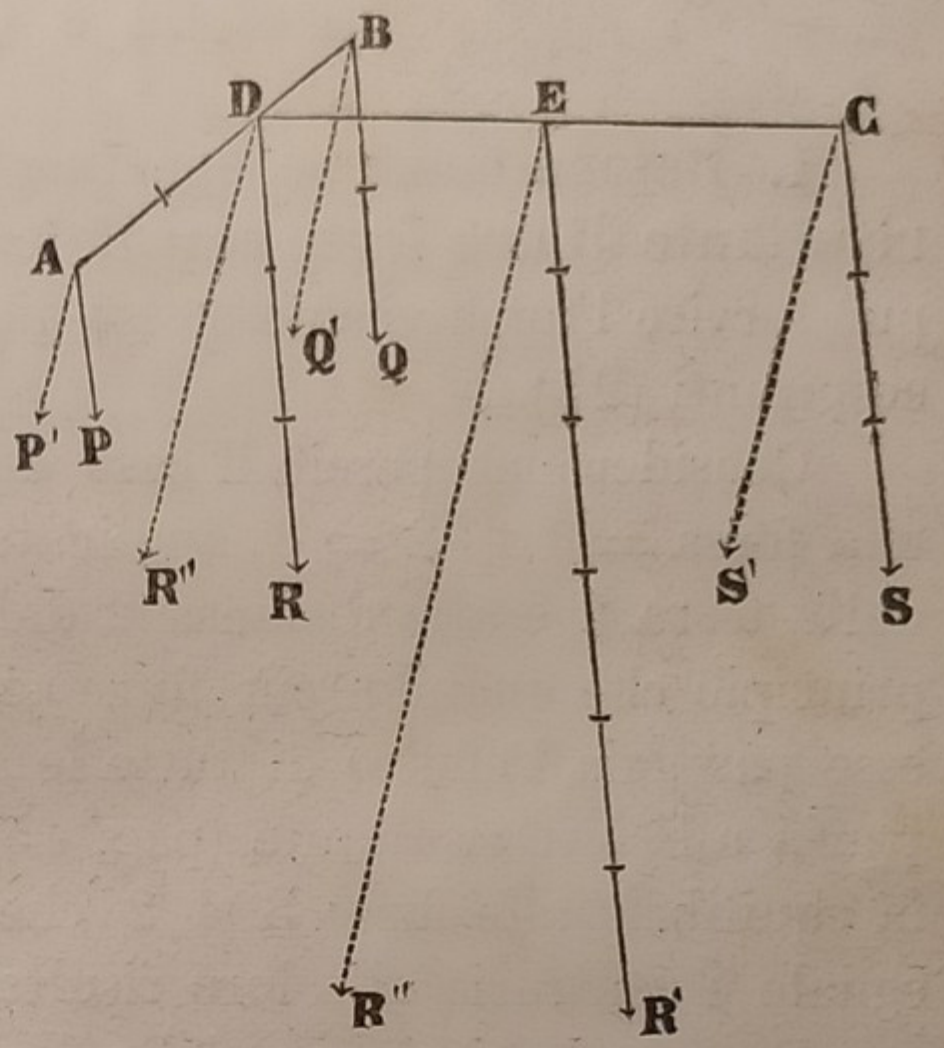


Fig. 26.

5. Centro delle forze parallele. — Il punto E, in cui è applicata la risultante di più forze parallele, chiamasi il *centro delle forze parallele.*

Esso ha le seguenti proprietà:

1° *Non varia col variare delle direzioni delle forze, purchè non mutino nè le loro intensità, nè i loro punti di applicazione,* perchè la sua posizione dipende solo da quella dei punti di applicazione delle componenti e dalle intensità delle medesime.

Supponiamo, p. es., che le tre dette forze prendano le direzioni AP′, BQ′ CS′ sempre parallele fra loro, ma che fanno colle primitive un angolo qualunque; cercando la risultante delle prime due, si trova che essa è rappresentata da una retta DR″, che passa ancora per il punto D; e cercando la risultante di tutte tre, si trova che essa è rappresentata da una retta ER″, che passa ancora per il punto E, per cui passava la risultante precedente, perchè le componenti hanno sempre la stessa grandezza.

2° *Se nel centro di più forze parallele si applica una forza eguale alla loro somma e parallela alle medesime, essa produce lo stesso effetto di tutte le forze parallele insieme,* perchè ne è la risultante.

3° *Se nel centro di più forze parallele si applica una forza eguale e contraria alla loro risultante, essa fa equilibrio a tutte le forze parallele,* perchè fa equilibrio alla loro risultante.

Tale proprietà appartiene solo al centro delle forze parallele.

§ 21. Risultante di due o più forze parallele e contrarie.

1. Determinazione sperimentale delle proprietà della risultante di due forze parallele e contrarie. — Per tale scopo può servire l'apparecchio stesso già usato per le forze parallele e cospiranti (25).

Consideriamo perciò il caso delle forze 1 e 2, equilibrate da una forza $= 1 + 2 = 3$, applicata in un punto alla distanza 1 dalla forza 2 e alla distanza 2 dalla forza 1, e rammentiamo il principio che quando più forze si fanno equilibrio ciascuna di esse pareggia l'effetto di tutte le altre, e quindi è uguale e contraria alla loro risultante (pag. 45). Per esempio, la forza 1 che fa equilibrio alle forze 3 e 2 che agiscono in verso contrario è eguale e contraria alla loro risultante.

Dunque la risultante delle forze 2 e 3 che agiscono verticalmente in verso contrario è una forza eguale e contraria alla forza 1, cioè è una forza diretta verticalmente in basso, ossia parallela e cospirante colla componente maggiore 3, eguale alla differenza $3 - 2 = 1$ delle componenti, e il suo punto di applicazione è al di fuori di quelli delle componenti, dalla parte della componente maggiore 3, alla distanza 2 da questa, e alla distanza 3 dalla componente minore 2.

Parimente, se la forza 2 fa equilibrio alle forze parallele e contrarie 3 e 1, è segno che essa pareggia l'effetto di queste due, e quindi è uguale e contraria alla loro risultante. Dunque la risultante delle forze 3 e 1, parallele e contrarie, è una forza eguale e contraria alla forza 2, cioè è una forza diretta verticalmente in basso, ossia parallela e cospirante colla forza maggiore 3, eguale alla differenza $3 - 1 = 2$ delle componenti, e il cui punto di applicazione è al di fuori di quelli delle componenti, dalla parte della maggiore 3, ad una distanza 1 dalla forza 3, e alla distanza 3 dalla forza 1.

2. Enunciato delle proprietà della risultante di due forze parallele e contrarie. — Quindi si deve concludere che la *risultante di due forze parallele contrarie ha le seguenti proprietà:*

1° *è parallela alle componenti e cospirante colla maggiore ;*

2° *eguale alla loro differenza ;*

3° *il suo punto di applicazione trovasi al di fuori di quelli delle componenti, dalla parte della componente maggiore, e dista dai punti di applicazione delle componenti di lunghezze inversamente proporzionali alle loro intensità.*

3. Coppia. — Se le due forze parallele e contrarie P e Q sono eguali, allora la risultante diviene :

$$R = P - Q = 0.$$

Dunque *la risultante di due forze parallele eguali e contrarie è nulla.*

Di più sarebbe facile dimostrare che *il punto di applicazione della risultante di due forze parallele, uguali e contrarie, è a distanza infinita dai punti di applicazione delle componenti.*

Un sistema di due forze parallele eguali e contrarie dicesi *coppia.*

4. Effetto di una coppia. — L'*effetto di una coppia* consiste nel produrre un moto rotatorio. Se ne hanno esempi nell'arganetto a vapore od eolipila, nell'arganetto idraulico ed elettrico, nelle turbine, nelle ruote pirotecniche, ecc.

5. Risultante di più forze parallele e contrarie. — Infine: *se una parte delle forze parallele agisce in un verso e l'altra in verso contrario, si compongono in una sola risultante tutte quelle che agiscono in un verso, ed in un'altra risultante tutte quelle che agiscono in verso opposto ; quindi si cerca la risultante di queste due forze parallele e contrarie.*

6. Condizioni per l'equilibro di un sistema di forze parallele. — Componendo in una sola le forze parallele dirette in un verso, e in un'altra quelle dirette in verso contrario, un sistema di forze parallele si può ridurre a due sole forze parallele ed opposte, che indicheremo con R′, R″.

Ora si possono presentare tre casi :

1° R′, R″ sono diseguali, ed allora il sistema delle forze ammette una risultante unica $R = R' - R''$

2° R', R'' sono eguali ma non hanno la stessa linea di azione; allora il sistema dato si riduce ad una coppia.

3° $R' = R''$ e hanno la stessa linea di azione. Allora il sistema sarà in equilibrio.

Dunque: *per l'equilibrio di un sistema di forze parallele non basta che sia nulla la loro somma algebrica, ma devono anche coincidere le linee di azione delle risultanti dei due gruppi di forze contrarie.*

§ 22. Momenti di rotazione.

1. Ricerca sperimentale delle condizioni da cui dipende l'effetto delle forze che tendono a produrre rotazione. — Ogniqualvolta un corpo è girevole attorno ad un punto o ad un asse ed è sotto l'azione di un forza la cui direzione non passa per questo, essa produce o tende a produrre rotazione del corpo attorno all'asse, ed importa conoscere le condizioni da cui dipende l'efficacia di una forza nel produrre il detto moto. A tale

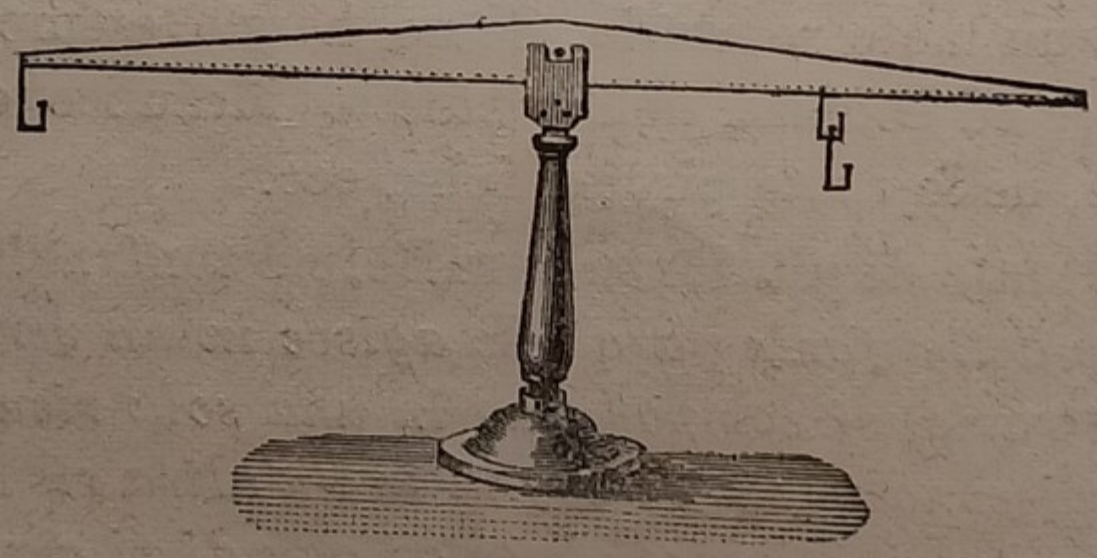


Fig. 27.

scopo consideriamo una verga od asta, lunga per es. 1 *m.*, sospesa su di un asse, permodochè essa stia orizzontalmente in equilibrio sul medesimo, e munita nella sua lunghezza di fori distanti fra loro 1 *cm.* (fig. 27).

Se a due fori egualmente distanti dall'asse di rotazione si appendono due pesi eguali, essi si fanno equilibrio, ma se le loro distanze dall'asse non sono eguali, quantunque la quantità di materia dall'una parte e dall'altra dell'asse sia sempre la stessa,

non vi è più equilibrio, e l'asta gira dalla parte ove è maggiore la distanza della forza dall'asse.

Il che si intende rammentando che le due forze applicate alla verga producono lo stesso effetto della loro risultante. Ora se la direzione di questa passa per l'asse, la sua azione è evidentemente equilibrata dalla resistenza del medesimo; se invece passa da una parte o dall'altra dell'asse, non essendo equilibrata da questo, essa fa girare il corpo dalla parte per cui passa. Ma la risultante di due forze parallele eguali divide la congiungente dei loro punti di applicazione in due parti eguali, e quindi passa precisamente per l'asse se i detti punti sono equidistanti da questo. Se invece uno di quei punti è più lontano che l'altro dall'asse, allora la risultante passando sempre pel punto di mezzo della loro distanza, passerà da una parte o dall'altra dell'asse, e quindi farà girare la verga dalla parte per cui passa.

Ma si può avere l'equilibrio della verga sull'asse di rotazione con due pesi diseguali per es., 1 e 2, purchè le loro distanze dall'asse sieno inversamente proporzionali alle loro intensità. Per es. se si mette il peso 1 alla distanza di 50 *cm.* dall'asse, e il peso 2 alla distanza di 25 *cm.*, si vede che si fanno equilibrio.

Il che si intende osservando che la risultante delle due forze 1 e 2 passa alle distanze 2 e 1 dalle medesime, e quindi precisamente per l'asse, ed è perciò equilibrata dalla resistenza di questo.

Si ottiene pure equilibrio con un peso 3 alla distanza di 10 *cm.*, e un peso 1 alla distanza $10 \times 3 = 30$ *cm.* dell'asse, ed in generale con *pesi inversamente proporzionali alle loro distanze dell'asse*, perchè con tale condizione la loro risultante passa sempre per l'asse.

Si noti che nel descritto apparecchio l'asse di rotazione è orizzontale e le forze costituite da pesi agiscono verticalmente, cioè in un piano perpendicolare all'asse, e quando la verga è orizzontale le rette che congiungono l'asse coi loro punti di applicazione sono perpendicolari alle forze, e costituiscono le distanze di queste dall'asse.

Dunque l'attitudine, o potere, di una forza per produrre rotazione attorno ad un asse, dipende da due fattori che sono: l'*intensità della forza* e *la distanza dell'asse dalla sua di-*

rezione, e quindi è in ragione composta di questi due fattori, come l'area di un rettangolo è in ragione composta della sua base e della sua altezza, e quindi è data dal prodotto di questi due fattori.

Per es., nell'altalena alla trave, il potere che ha una persona di fare girare la trave dalla sua parte dipende non solo dal suo peso, ma anche dalla sua distanza del punto di appoggio o fulcro, e quindi è in ragione composta di questi due fattori, uno dei quali può compensare l'altro. Perciò la persona che ha minor peso deve essere più distante dal fulcro, per potere alla sua volta fare abbassare la trave della sua parte.

2. Braccio e momento di rotazione. — La distanza della direzione di una forza da un punto si dice in meccanica *braccio di rotazione* della forza rispetto a quel punto e il prodotto della forza per il suo braccio di rotazione si chiama *momento di rotazione* della forza rispetto a quel punto, perchè rappresenta il momento, o potere, o importanza di una forza nel determinare la rotazione di un corpo attorno ad un punto fisso.

Di più, i momenti di rotazione si dicono *simili* o *dissimili* secondochè tendono a produrre rotazione nello stesso senso od in senso contrario. E si usa di denominare *positivi* i momenti che tendono a fare girare un corpo nel senso del movimento delle lancette di un orologio, e *negativi* quelli che tendono a farlo girare in senso contrario, e la somma dei momenti positivi e negativi chiamasi *somma algebrica*. Questa è eguale alla somma aritmetica se i momenti di rotazione hanno lo stesso segno, ed è invece eguale alla differenza se una parte dei momenti è positiva e l'altra negativa.

Il momento di rotazione di una forza è nullo quando è nullo l'uno o l'altro dei suoi fattori, cioè è nulla la forza, o nullo il braccio. Per es., quando la risultante di più forze che tendono a produrre rotazione passa per l'asse, il suo momento di rotazione è nullo perchè è nullo il suo braccio, e quindi essa non produce rotazione.

3. Momento di rotazione di una forza obliqua alla retta congiungente il suo punto di applicazione con l'asse. — Se la direzione della forza fosse obliqua alla retta congiungente il suo punto di applicazione coll'asse, come avverrebbe per la forza $b\,R$ (fig. 28) rispetto alla retta $a\,b$, supposta

girevole attorno al punto fisso f, allora si deve osservare che la forza $b\,R$ produce l'effetto delle sue due componenti, $b\,d$ parallela alla retta $a\,b$, e $b\,R'$ perpendicolare alla stessa retta. Ora la componente $b\,d$ non tende a produrre rotazione, ma solo a fare scorrere la retta $a\,b$ sul punto f se essa non è saldamente congiunta a questo, per es., mediante una cerniera, e solo la componente perpendicolare $b\,R'$ tende a produrre rotazione della retta attorno al punto f, col momento $f\,b \times b\,R'$.

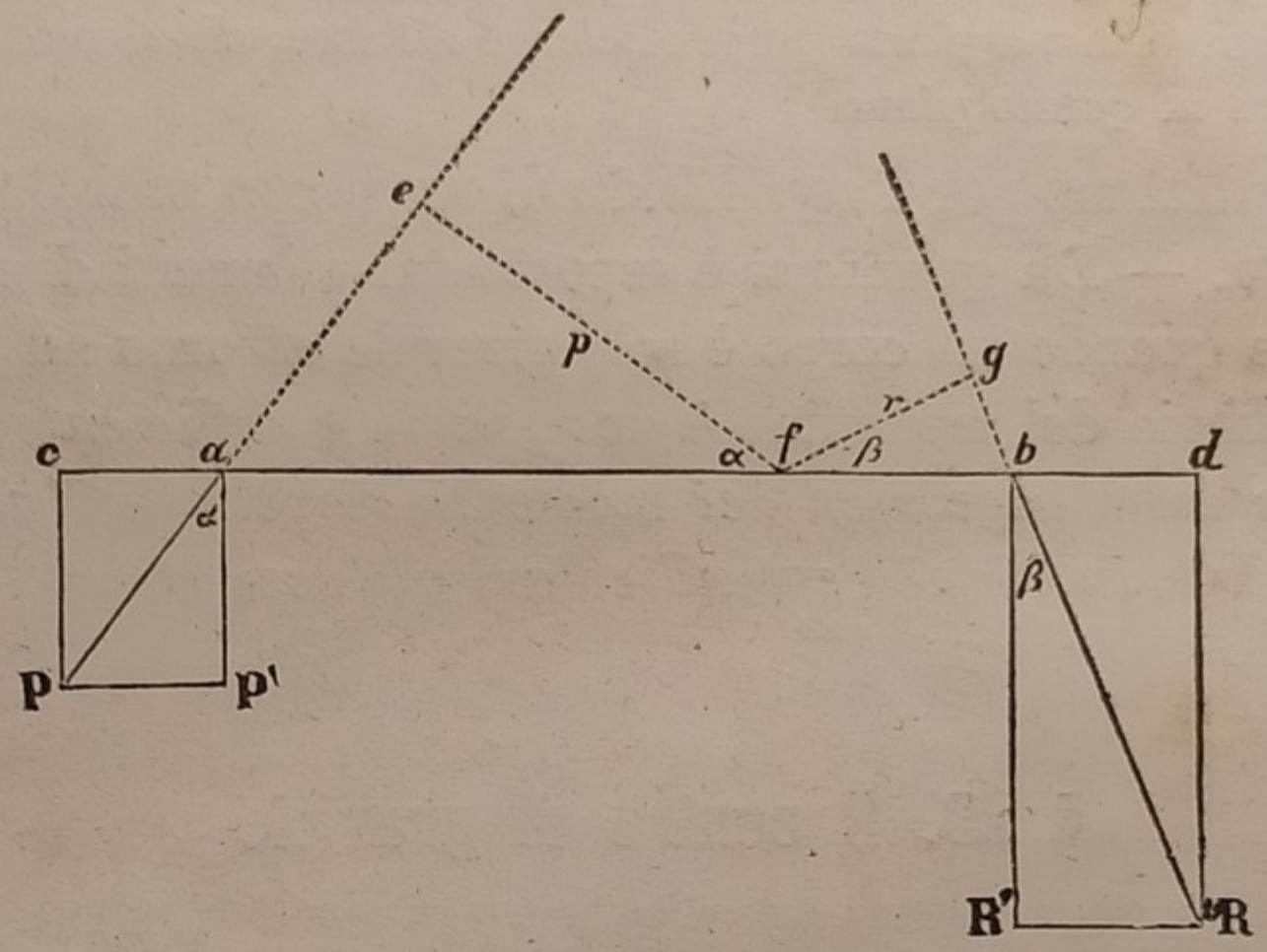


Fig. 28.

Ma il momento di rotazione della forza $b\,R$ obliqua alla retta $a\,b$ si può anche esprimere mediante il prodotto della forza stessa per la perpendicolare $f\,g$ abbassata dal punto f sulla direzione della detta forza.

Infatti i triangoli $f\,b\,g$, $b\,R\,R'$ sono simili, perchè equiangoli, essendo $f\,g\,b = b\,R'\,R$ perchè retti, e $f\,b\,g = R'\,R\,b$ perchè corrispondenti; quindi si ha la proporzione fra i lati omologhi:

$$b\,R : b\,R' = f\,b : f\,g$$

d'onde si ricava:

$$f\,g \times b\,R = f\,b \times b\,R'.$$

Dunque: *il momento di rotazione di una forza obliqua alla retta che congiunge il suo punto di applicazione coll'asse* è dato: *o dal prodotto della distanza dell'asse dal punto di applicazione della forza per la componente di questa che è perpendicolare alla detta distanza, o dal prodotto della forza stessa per la distanza dell'asse dalla sua direzione.*

4. Momento di rotazione di una forza parallela all'asse. — È poi evidente che una forza qualunque parallela all'asse non tende a produrre moto di rotazione intorno a questo, ma solo spostamento del corpo lungo il medesimo, e quindi il suo momento di rotazione rispetto all'asse è nullo.

5. Momento di rotazione di una forza che agisce obliquamente ad un piano perpendicolare all'asse di rotazione. — Infine se una forza agisce su un corpo girevole attorno ad un asse, obliquamente ad un piano perpendicolare a questo, si deve osservare che essa si può sempre scomporre in due componenti, una delle quali è parallela all'asse e l'altra è contenuta in un piano perpendicolare a questo. La 1ª componente non tende a produrre rotazione, ma solo a fare scorrere il corpo lungo l'asse, e quindi il momento di rotazione della forza data si riduce a quello della componente che agisce in un piano perpendicolare all'asse, od al momento della forza risoluta in questo piano.

6. Condizione per l'equilibrio di un corpo mobile attorno ad un asse. — Da quanto si è esposto sui momenti di rotazione risulta che quando un corpo è solo girevole attorno ad un asse, per l'equilibrio del medesimo è *necessario e sufficiente che sia nulla la somma algebrica dei momenti rispetto all'asse delle forze risolute in piani perpendicolari all'asse stesso.*

§ 23. Il centro di gravità.

1. I corpi si possono considerare come soggetti a sistemi di forze parallele. — La natura ci presenta esempi di sistemi di forze parallele nei pesi delle molecole dei corpi, perchè questi costituiscono altrettante forze dirette verso il centro della terra, e per la grande distanza di questo punto gli angoli delle dette forze sono trascurabili, cioè queste si possono considerare come *parallele*.

2. Centro di gravità. — Il sistema delle forze parallele a cui è soggetto un corpo equivale alla forza unica che ne è la risultante. Il punto di applicazione di questa chiamasi *centro di gravità del corpo*. Dunque *il centro di gravità di un corpo* si può definire: *il centro delle forze parallele costituite dai pesi delle sue molecole.*

Il centro di gravità dei corpi dicesi anche *baricentro*.

3. Proprietà del centro di gravità. — Questo ha le seguenti proprietà, corrispondenti a quelle del centro delle forze parallele (pag. 51).

1° *Non varia comunque varii la posizione del corpo purchè non muti la sua forma;* perchè il centro delle forze

parallele non varia col variare della loro direzione, purchè non mutino i loro punti di applicazione.

Esso non varierebbe di posizione anche se il corpo invece di essere soggetto alla gravità fosse soggetto ad un'altra forza di diversa intensità, ma della stessa natura, come avverrebbe, per es., se il corpo fosse trasportato su un'altro pianeta, ove l'intensità della forza di gravità fosse diversa.

2° *Nel centro di gravità di un corpo si può considerare raccolto tutto il suo peso.* Infatti, se nel centro di gravità di un corpo si applica una forza verticale eguale al suo peso, essa produce lo stesso effetto di questo, perchè la risultante di più forze produce lo stesso effetto delle componenti prese insieme.

3° *Un corpo è sostenuto, se è sostenuto il suo centro di gravità; se questo non è sostenuto, il corpo cade.* Perchè tutte le forze di gravità costituite dai pesi delle molecole di un corpo si riducono ad una risultante applicata al suo centro di gravità, e per fare equilibrio alle componenti basta fare equilibrio alla loro risultante.

4. **Definizione sperimentale del centro di gravità.** — Quindi il centro di gravità si può anche definire: *quel punto, sostenuto il quale, tutto il corpo è sostenuto.*

Tale definizione vale anche quando il centro di gravità è collocato fuori del corpo, purchè si supponga che detto centro sia congiunto cogli altri punti del medesimo. Per es., un anello ha il suo centro di gravità nel suo centro, e quindi fuori della materia dell'anello; ma supposto sostenuto detto centro e congiunto cogli altri punti dell'anello è sempre vero che è sostenuto tutto il corpo.

5. Posizione del centro di gravità delle figure e corpi simmetrici rispetto ad un punto. — La determinazione geometrica generale del centro di gravità dei corpi richiede il soccorso del calcolo superiore. Solo nel caso di corpi di figura regolare ed omogenei, cioè di struttura uniforme, si può trovare il centro di gravità con considerazioni geometriche elementari.

In generale, nei corpi omogenei e simmetrici rispetto ad un punto, il centro di gravità giace in questo, perchè il punto di applicazione della risultante di più forze parallele eguali, è egualmente distante dai punti di applicazione delle componenti.

Per es., il centro di gravità di una linea retta, supposti i suoi punti pesanti, giace nel suo punto di mezzo, perchè i suoi punti sono a due a due equistanti dal medesimo.

Quindi il centro di gravità di un parallelogrammo è nel mezzo delle sue diagonali. Così pure il circolo, i poligoni regolari, la sfera, i corpi regolari, gli anelli, hanno il loro centro di gravità nel centro di figura; i cilindri, i prismi regolari, i solidi di rivoluzione, che constano di due parti eguali, nel mezzo del loro asse; i parallelepipedi nel mezzo delle loro diagonali.

6. Centro di gravità di un triangolo. — Il centro di gravità di un triangolo (a, b, c, fig. 29) deve trovarsi su una qualunque delle sue mediane ($a\,m$, $b\,m'$) perchè una qualunque di queste rette passa pei punti di mezzo di tutte le rette parallele ad uno dei lati che si possono considerare nel triangolo; ovvero, perchè una mediana divide il triangolo in due parti di eguale superficie. Dovendo pertanto il centro di gravità trovarsi su due mediane qualunque si troverà nel loro punto di intersezione. Ora si dimostra colla geometria elementare che le mediane di un triangolo si intersecano a $^2/_3$ di ciascuna, partendo dal vertice (*), quindi risulta che *il centro di gravità di un triangolo si trova su una qualunque delle sue mediane a* $^2/_3$, *partendo dal vertice.*

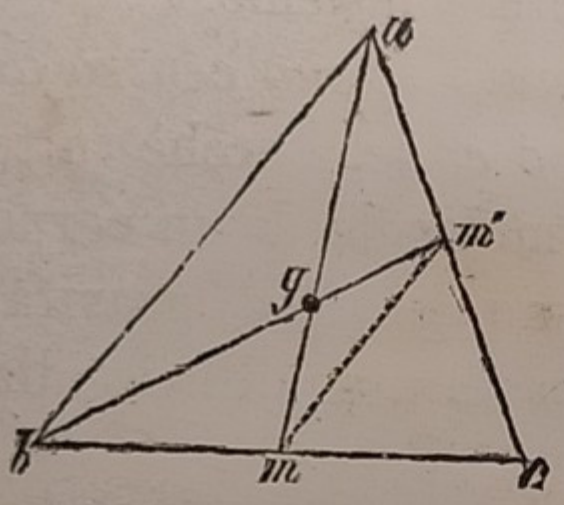


Fig. 29.

7. Centro di gravità di un poligono. — Il centro di gravità di un trapezio si trova nell'incontro della sua mediana colla retta congiungente i centri di gravità dei due triangoli in cui esso può essere diviso da una diagonale.

In generale, *per trovare il centro di gravità di un poligono*, lo si divide in tanti triangoli quanti sono i lati meno 2, mediante diagonali condotte da un angolo; quindi si cerca il centro di gravità di ciascun triangolo, e in questi centri si considerano forze parallele proporzionali alle aree dei triangoli. Allora si cerca il centro di tali forze parallele, che sarà il centro di gravità del poligono.

(*) Infatti, se nel triangolo $a\,b\,c$ (fig. prec.) si tira la $m\,m'$, i due triangoli simili $a\,g\,b$, $m\,g\,m'$ danno: $\frac{a\,b}{m\,m'} = \frac{a\,g}{g\,m}$. Ma $a\,b$ è doppio di $m\,m'$, perchè $b\,c = 2\,m\,c$, $a\,c = 2\,m'\,c$, dunque sarà pure $a\,g$ doppio di $g\,m$; cioè il punto g si trova sulla mediana $a\,m$ a $^2/_3$ dal vertice a.

8. Centro di gravità di una piramide e di un cono. — Così pure si dimostra geometricamente che *il centro di gravità di una piramide triangolare* (s a b c, fig. 30) *giace sulla retta* (s g) *che congiunge il vertice col centro di gravità* (g) *della base, a* $^3/_4$ *partendo dal vertice.*

Lo stesso vale per una piramide qualunque, e quindi per un cono.

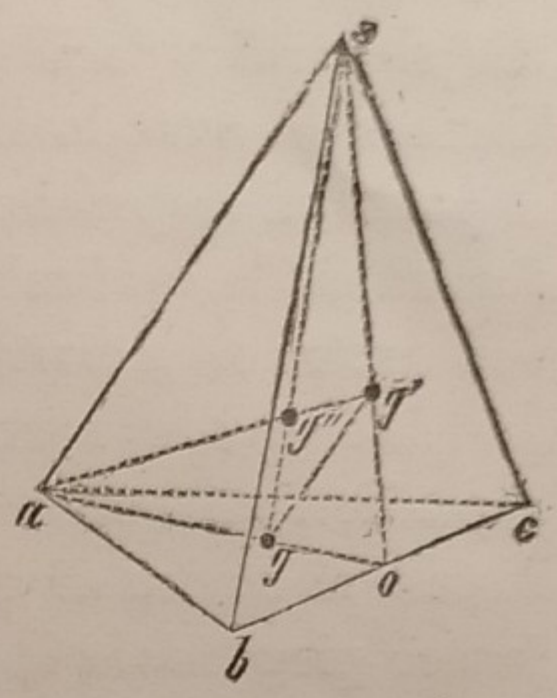


Fig. 30.

9. Centro di gravità di un corpo non omogeneo. — Invece il centro di gravità di un corpo regolare, ma non omogeneo, ovvero di un corpo non omogeneo nè regolare, per es., di un martello, o di un bastone munito ad una estremità di una massa pesante, giace più vicino alle parti più pesanti, perchè il punto d'applicazione della risultante di più forze parallele disuguali è sempre più vicino alle componenti maggiori (pag. 50).

Questo centro si può determinare sperimentalmente come si vedrà nel § seguente.

§ 24. Equilibrio dei corpi sotto l'azione della gravità.

1. Equilibrio dei corpi sospesi. — Un corpo può essere impedito di cadere, ossia sostenuto, in due sole maniere, cioè per sospensione o per appoggio.

Così un filo a piombo ed un pendolo sono sostenuti mediante sospensione, ed una tavola mediante appoggio.

Per quanto riguarda la sospensione si noti che siccome il peso di ogni corpo si riduce ad una forza verticale applicata al suo centro di gravità (pag. 59), è evidente che, se la direzione di questa forza passa pel punto fisso, essa non può produrre moto progressivo, perchè a questo si oppone la resistenza del detto punto, e non può produrre moto rotatorio perchè il suo braccio di rotazione rispetto ad esso è nullo (pag. 56).

Dunque *la condizione di equilibrio di un corpo sospeso ad un punto* è che: *la verticale passante pel suo centro di gravità passi anche per il punto di sospensione.*

2. Prova sperimentale. — Si può dare la *prova sperimentale* dell'enunciato teorema mediante un corpo regolare ed omo-

geneo, del quale si conosce la posizione del centro di gravità, per es., una lastra rettangolare o circolare. Sospendendolo con un filo si verifica facilmente col filo a piombo che esso è in equilibrio solo quando il centro di gravità giace verticalmente sotto il punto di sospensione. Se si sposta il corpo da una parte o dall'altra della verticale e poi lo si abbandona esso oscilla finchè il suo centro di gravità riposi nella detta verticale.

Riesce anche utile per tale dimostrazione una tavoletta di legno con un manubrio pieghevole a cerniera. Lasciando questo disteso il centro di gravità giace sulla direzione del manubrio: invece piegandolo il centro di gravità si porta dalla parte verso cui venne piegato.

Se al manubrio si applica un anello pesante di piombo o altro metallo si può rendere più sensibile lo spostamento del centro di gravità.

3. Determinazione sperimentale del centro di gravità. — L'enunciato teorema somministra il modo di determinare sperimentalmente la posizione del centro di gravità di un corpo qualunque.

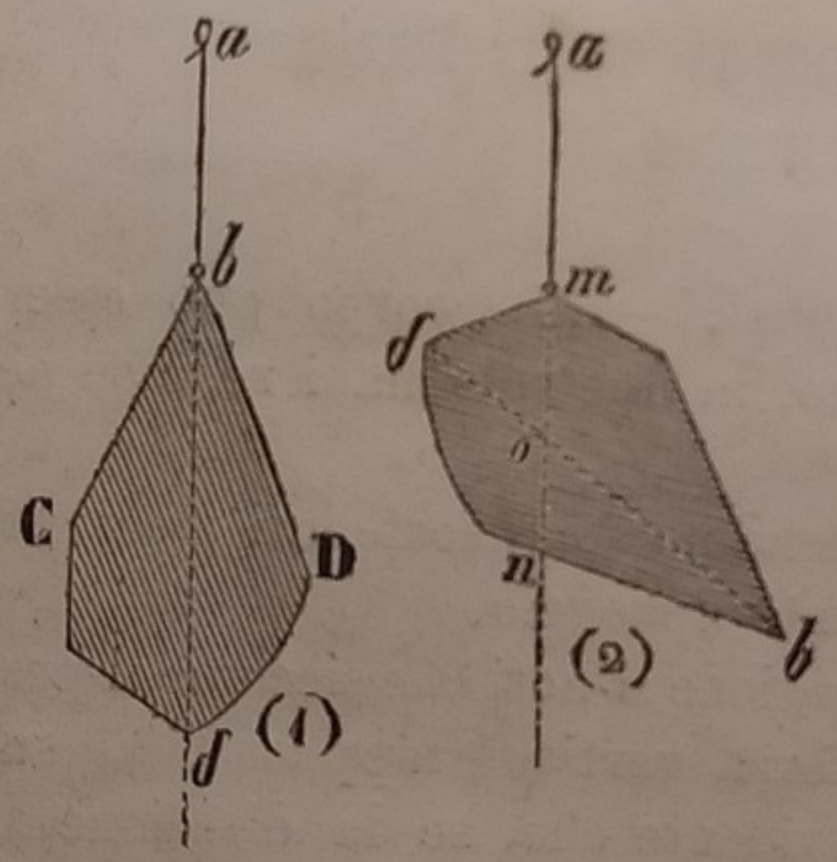


Fig. 31.

Perciò lo si sospende mediante un filo (ab, fig. 31), ad un punto fisso (a) assieme con un filo a piombo, e si segna la direzione di questo sulla superficie o nell'interno del corpo, sulla quale direzione verticale, come sappiamo (pag. 61) deve trovarsi il centro di gravità del corpo quando esso è in equilibrio. Ripetendo l'operazione per un'altra posizione (2) del corpo, il centro di gravità di questo si troverà nel punto comune alle due verticali.

4. Condizione per l'equilibrio di un corpo appoggiato. — Se il corpo è *appoggiato* si chiama *base la superficie compresa fra le rette che congiungono i punti di appoggio più esterni.* Per es., la base del corpo umano è il trapezio costituito dai piedi e dalle rette parallele che congiungono le due estremità dei me-

desimi. La base di una tavola è il rettangolo formato dalle rette che congiungono i punti di appoggio delle sue quattre gambe.

Quanto alla condizione per l'equilibrio di un corpo appoggiato, siccome il peso di un corpo si riduce ad una forza verticale applicata al suo centro di gravità, è evidente che se essa passa per la base non può produrre moto progressivo, perchè a questo si oppone la resistenza di un punto fisso della base, e non può produrre moto rotatorio perchè il suo braccio di rotazione rispetto a quel punto fisso è nullo.

Se invece passa fuori della base possederà un braccio di rotazione rispetto ai punti più vicini di questa che gli stanno a fianco, e quindi farà girare il corpo per collocarlo in un'altra posizione in cui il suo braccio di rotazione è nullo.

Dunque la *condizione d'equilibrio di un corpo appoggiato* è che: *la verticale condotta pel suo centro di gravità passi per la base.*

5. Prove sperimentali. — Un parallelepipedo, o cilindro obliquo (fig. 32), avente il suo centro di gravità in un punto (*o*), tale che la verticale del suo centro di gravità non passi fuori della base, sta in piedi su un piano orizzontale. Ma se sul medesimo parallelepipedo, o cilindro, se ne mette un altro di eguale base, per modo che formi con esso un parallelepipedo, o cilindro unico più lungo del primiero, avente perciò il centro di gravità (*o'*) più in alto, e la cui verticale passa fuori della base, si vede che tale corpo più non istà in piedi, ma cade sempre dalla parte da cui il centro di gravità esce verticalmente fuori della base.

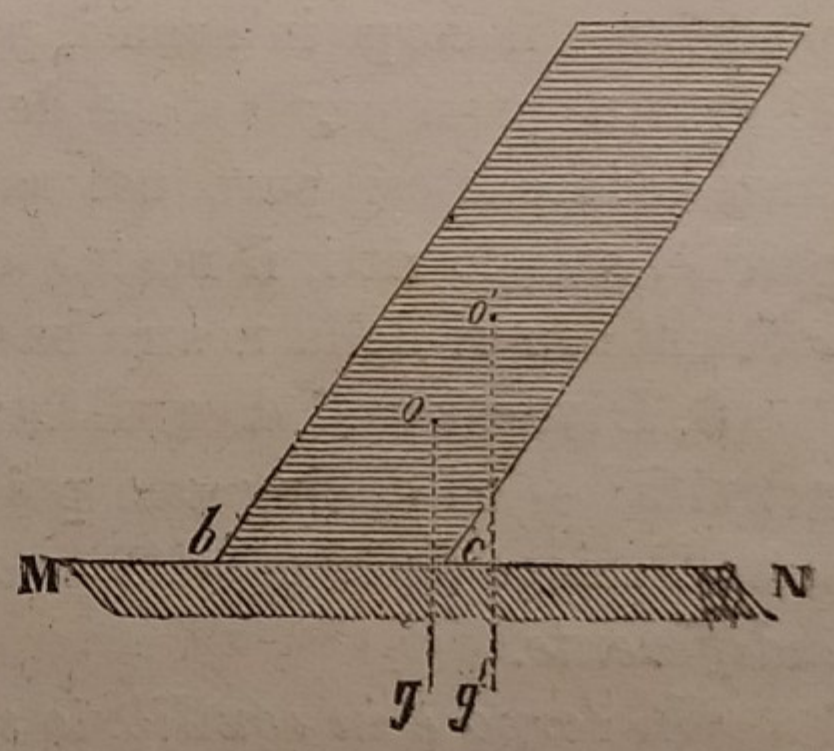


Fig. 32.

Se si adopera un parallelepipedo che abbia una punta nel centro di figura di una delle faccie laterali, si può a quella attaccare un piccolo filo a piombo, col quale si nota la direzione della verticale corrispondente al centro di gravità, per verificare l'enunciato.

Si può dimostrare lo stesso fatto, ponendo un cilindro o prisma su di un piano di livello che si inclina a vite finchè la verticale del suo centro di gravità esca dalla base.

Edifizi inclinati, come le torri di Pisa, di Bologna, di Saragozza, non cadono perchè la verticale del loro centro di gravità passa ancora per la loro base. Però, basterebbe che la gravità fosse inferiore all'adesione tra il cemento e le pietre, perchè, a guisa di bastone obliquamente impiantato nel suolo, torri e muri potessero stare in piedi, malgrado che il loro centro di gravità giacesse verticalmente fuori della loro base.

Anche i corpi degli animali sono sottoposti a tali leggi. Chi porta un peso sulla schiena è costretto ad inclinare il corpo innanzi, perchè la verticale del nuovo centro di gravità del suo corpo e del peso che sostiene non cada fuori della base. Chi ha la pancia grossa incurva il corpo indietro; chi porta un peso a destra piega il corpo a sinistra, sempre perchè la verticale del centro di gravità non cada fuori della base. Chi poi porta pesi eguali da due parti opposte sta diritto. E per alzarci da sedere pieghiamo il corpo in avanti, perchè la verticale del nostro centro di gravità passi per la base dei piedi, ciò che non avviene nello stare seduto. Così pure nel salire i monti ci incliniamo innanzi, perchè, stando ritti, il nostro centro di gravità cadrebbe verticalmente fuori della nostra base.

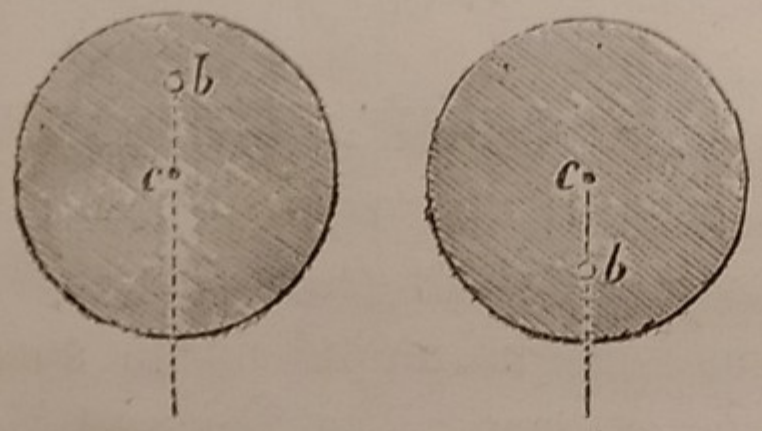
6. Diversi casi d'equilibrio dei corpi sotto l'azione della gravità. — Si distinguono poi *tre stati di equilibrio* dei corpi sotto l'azione della gravità: *stabile*, *labile* o *instabile*, *neutro* o *indifferente*.

Un corpo è in equilibrio stabile quando, spostato dalla sua posizione, vi ritorna. Il che avviene quando il corpo è sospeso ad un punto, o ad un asse, sovrastante verticalmente al suo centro di gravità, perchè se esso viene spostato, tale centro si solleva, e poi non essendo più sostenuto, ricade nella posizione primiera.

Esempio di questo equilibrio si ha in ogni corpo sospeso a guisa di un pendolo, ad un punto, o ad un asse b, (fig. 33, a) superiore al suo centro di gravità c.

L'equilibrio stabile di questa specie è applicato nella *sospensione cardanica* della bussola e delle lampade dei battelli (fig 34).

La loro scatola (S) è appesa ad un primo anello interno (*n n*) per mezzo di un asse orizzontale (*qa*) attorno a cui può girare; tale anello è alla sua volta girevole attorno ad un secondo asse (AA) perpendicolare al primo, sostenuto da un secondo anello (NN) esterno, in modo che il centro di gravità della scatola è inferiore ai due anelli. Così essa può liberamente girare attorno a due assi perpendicolari, in modo da rimanere stabilmente orizzontale, malgrado le inclinazioni della nave.



a Fig. 33. *a'*

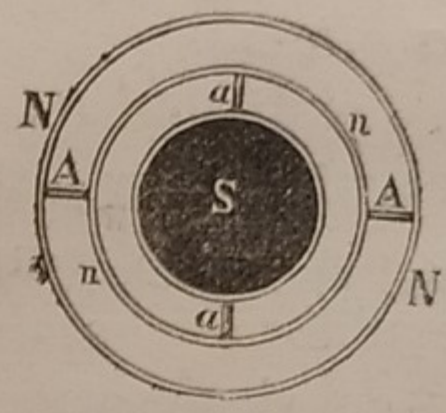


Fig. 34.

L'equilibrio di un corpo dicesi labile o *instabile quando, spostato dalla sua posizione, non vi ritorna.* — Il che avviene quando il corpo è appoggiato su di un punto o su di una linea inferiore al suo centro di gravità. Tale è il caso di un disco appoggiato orizzontalmente su di una punta, o verticalmente (fig. 33, *a'*) su di un asse orizzontale che lo attraversa (in *b*) al di sotto del suo centro (*c*) di gravità.

E ciò perchè nell'equilibrio instabile il centro di gravità, avendo posizione superiore al punto d'appoggio, quando il corpo viene spostato quello si abbassa e cade finchè è possibile, cioè finchè sia venuto nella posizione dell'equilibrio stabile.

Infine *un corpo si dice in equilibrio indifferente quando esso è in equilibrio in qualunque posizione che può assumere.*

Ciò ha luogo quando il centro di gravità ed il punto di appoggio coincidono, come avviene in una ruota girevole sul suo asse; ovvero quando il corpo ha tale forma che, malgrado qualunque spostamento, il centro di gravità giace sempre verticalmente al di sopra del punto o della linea di appoggio, come avviene in una sfera su di un piano, ovvero in un cono e in un cilindro collocato parimente su di un piano per un suo lato.

Un uovo collocato su di un piano col suo asse maggiore ver-

ticale ha un equilibrio instabile, perchè spostato da tale posizione non vi ritorna da sè; invece collocato col suo asse maggiore orizzontale ha un equilibrio neutro rispetto al suo asse minore, che può prendere posizione qualunque, mentre ha un equilibrio stabile rispetto al suo asse maggiore, che tende a conservarsi orizzontale.

In tutti i casi si scorge che l'*equilibrio è stabile, od instabile, od indifferente, secondochè un lieve spostamento tende a sollevare o ad abbassare il centro di gravità, o a lasciarlo alla stessa altezza.*

7. Condizioni da cui dipende la stabilità dell'equilibrio dei corpi appoggiati. — Nel caso di un corpo sospeso ad un punto, o ad un asse superiore al suo centro di gravità, la stabilità dell'equilibrio è *assoluta,* cioè sussiste qualunque sia lo spostamento cui viene sottoposto il corpo attorno al detto asse. Ma la maggior parte dei corpi pesanti sono appoggiati su di una superficie, o base, inferiore al loro centro di gravità, e allora la loro stabilità è solo *relativa*, o *limitata.*

La stabilità relativa dei corpi appoggiati è, in generale, tanto maggiore quanto più basso è il centro di gravità e quanto maggiore è la base e il peso del corpo.

Infatti, quanto più basso è il centro di gravità tanto maggiore è l'arco di cui esso deve essere spostato, affinchè si trovi verticalmente fuori della base; e quanto maggiore è la base tanto maggiore è ancora il raggio dell'arco che il centro di gravità deve percorrere per trovarsi verticalmente fuori di quella.

Infine, col crescere del peso del corpo, cresce la sua stabilità, perchè cresce la forza necessaria per produrre in esso lo spostamento che lo fa cadere.

Perciò i piedestalli di oggetti cui si vuole dare maggiore stabilità di equilibrio vengono gravati con piombo, e nel fare le cariche dei carri e delle navi gli oggetti più pesanti vengono collocati in basso.

Colonne di legno cadono più facilmente che colonne eguali di pietra, perchè avendo minor massa richieggono minor forza pel rovesciamento.

Ed un corpo può essere protetto dal cadere, o *bilanciato*, quando si porta tosto il punto di appoggio sotto la nuova posi-

zione del centro di gravità, come si fa quando si sostiene un bastone verticalmente su un dito. Codesto bilanciamento riesce tanto più facile quanto più il corpo è pesante, e più elevato è il suo centro di gravità; perchè col crescere del peso, più facilmente si sente ogni spostamento del medesimo; col crescere poi dell'altezza del centro di gravità questo deve nel cadere descrivere più grande arco, e si ha maggior tempo a portare la base al di sotto della nuova posizione di quel centro, per impedire cosí al corpo la caduta.

Le piramidi posseggono maggior stabilità dei prismi di egual base e altezza, perchè hanno il centro di gravità più vicino alla base.

Fra i poliedri, il tetraedro o tetragono, regolare, presenta eguale stabilità su ogni faccia, perchè ha le 4 faccie uguali ed il centro di gravità egualmente alto.

Il corpo umano ha minor stabilità di quello degli animali, perchè ha relativamente piccola base, ed il centro di gravità piuttosto elevato; perciò l'uomo impara a camminare con maggior difficoltà degli animali, deve continuamente bilanciarsi, e cade facilmente se perde la consapevolezza di sè.

Per accrescere la stabilità dell'equilibrio del nostro corpo quando si ha da fare qualche sforzo, aumentiamo la base, allontanando i piedi.

§ 25. Leggi della caduta dei gravi.

1. Eguale velocità che acquistano in egual tempo i corpi liberamente cadenti. — Si è già detto (§ 15) che si chiama *gravità* la forza che fa cadere i corpi, e che essa è un caso particolare di un'altra forza più generale denominata *attrazione universale*. Ora si tratta di studiare le leggi del movimento prodotto dalla gravità, ossia le leggi della caduta dei gravi.

Tutti sanno che nell'aria un pezzo di ferro cade più velocemente che un foglio di carta, o un fiocco di cotone, ma ciò che non tutti sanno prima di avere studiato la Fisica, si è che: *senza la resistenza dell'aria tutti i corpi cadono insieme, cioè colla stessa velocità*, il che costituisce la 1ª legge della caduta dei gravi.

Si prova sperimentalmente questo fatto, a primo aspetto strano, mediante un tubo di vetro piuttosto lungo (fig. 35), nel quale si pongono un pezzetto di piombo, ritagli di carta, barbe di penna.

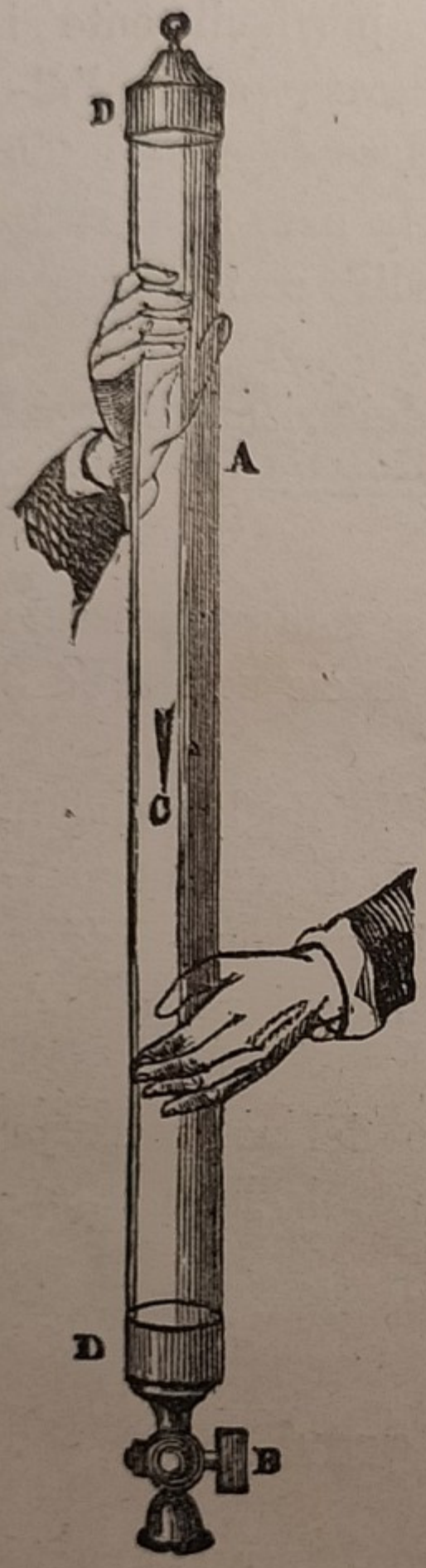


Fig. 35.

Finchè nel tubo vi è l'aria, capovolgendolo per modo che i detti corpi si trovino alla sommità, si sente il piombo urtare il fondo, mentre i corpi leggieri si veggono restare indietro e cadere lentamente. Ma se si ripete l'esperienza dopo avere estratta l'aria dal tubo mediante la pompa pneumatica, quando si sente l'urto del metallo contro il fondo, si veggono ivi anche i corpi leggieri. Lasciando poi rientrare l'aria, a poco a poco, si vede che il ritardo dei medesimi rispetto al metallo nel cadere va crescendo a misura che rientra l'aria. Questa esperienza è dovuta a Newton (1666).

Un esperimento analogo si può fare più semplicemente così: si taglia un dischetto di carta del diametro di un soldo, e poi lo si lascia cadere a fianco di un disco di metallo alquanto più largo, come un doppio soldo, e si vede in tal caso che la carta arriva al suolo più lentamente che il metallo. Ma se si sovrappone il disco di carta a quello di metallo, in maniera che questo possa riparare quello dalla resistenza dell'aria, si veggono i due dischi arrivare insieme al suolo.

Ora chi ha mente un poco filosofica, cioè amante del sapere, desidera conoscere la causa di questi due fatti: 1° perchè senza la resistenza dell'aria i corpi cadono con eguale velocità; 2° perchè nell'aria i corpi cadono con velocità differente.

Per rispondere alla 1ª domanda devesi dapprima rispondere a questa: che cosa si richiede perchè una palla da cannone avente, per es., una massa e quindi un peso 1000 volte maggiore di una palla da schioppo, acquisti la stessa velocità di questa? Evidentemente bisogna che la forza che spinge la prima sia 1000 volte

maggiore di quella che spinge la seconda. Ma la gravità agisce appunto sui corpi proporzionalmente alle loro masse o quantità di materia (pag. 31), perciò comunica ai medesimi eguale velocità, senza la resistenza dell'aria. Per es., se la moneta, di cui si è parlato or ora, ha una massa 1000 volte maggiore del dischetto di carta, la gravità agisce su di essa con una attività 1000 volte maggiore, e perciò le comunica eguale velocità. Anzi questo fatto della eguale velocità dei corpi cadenti è appunto una prova della proporzionalità della gravità alle masse.

Per rispondere alla 2ª domanda conviene dapprima rispondere alle due seguenti: ove si esercita la resistenza dell'aria, alla superficie o nell'interno dei corpi? Evidentemente alla superficie. Ora presenta maggior superficie un *kg.* di piombo o un *kg.* di cotone? Evidentemente questa massa ha assai maggior volume e superficie di quella, e perciò trova assai maggiore resistenza per parte dell'aria, e perciò cade più lentamente.

Dunque nell'aria i corpi cadono con velocità differente perchè incontrano differente resistenza per parte di essa.

E ciò è ancora confermato dalle seguenti osservazioni. Mentre una pietra cade celermente, la stessa, ridotta in polvere e sollevata dal vento, avendo acquistato maggior superficie in contatto dell'aria, cade lentissimamente. Parimenti mentre l'acqua dei torrenti che scende dai monti e costituisce le *cascate* cade celermente, la stessa ridotta in minutissime goccioline, siccome nelle nubi e nelle nebbie, cade lentissimamente.

2. Accrescimento della velocità dei corpi liberamente cadenti col tempo. — La velocità di un corpo cadente è costante o variabile?

Molte osservazioni comuni ci dimostrano già che la velocità di un corpo cadente va crescendo continuamente. Eccone alcune.

Per estrarre l'acqua dai pozzi si usava assai nei tempi scorsi, e si usa tuttora in alcuni luoghi, un cilindro attorno al quale è avvolta una fune, che passa su di una carrucola e alla cui estremità è attaccato il secchio. L'apparecchio si denomina *verricello*, e lo si adopera anche dai muratori per estrarre la terra dai pozzi che scavano. Ora se invece di fare girare il cilindro con la mano

vella di cui è munito, lo si lascia girare liberamente sotto l'azione traente del peso del secchio, si vede che la velocità di rotazione del cilindro e quindi quella discendente del secchio va continuamente crescendo.

Parimenti per affondare i pali nella costruzione dei ponti si lascia cadere sulla loro testa un peso che si solleva dapprima ad un'altezza più o meno grande. Ora col crescere dell'altezza della caduta del peso cresce pure la penetrazione del palo nel terreno, evidentemente perchè è maggiore la velocità del peso cadente, e quindi l'efficacia dell'urto, quantunque la massa o quantità di materia cadente sia sempre la stessa.

Dunque l'osservazione ordinaria dimostra già che la velocità dei corpi cadenti non è costante, ma cresce continuamente. Il che avviene così: La forza di gravità comunica al corpo nel primo istante una certa velocità, che esso, per la legge d'inerzia (p. 25), conserva e porta con sè nel secondo istante; ma la forza di gravità è anche in questo operosa, e comunica al cadente corpo un nuovo incremento di velocità, che si somma con quello del primo istante; con tale accresciuta velocità comincia esso la sua caduta nel terzo istante in cui riceve un nuovo incremento della medesima, e così innanzi.

Per giungere poi a trovare la legge con cui cresce la velocità dei corpi cadenti liberamente, cioè senza la resistenza dell'aria, poichè l'influenza di questa, come si è detto, varia colla superficie dei corpi, si deve notare che la gravità cresce bensì coll'avvicinamento dei corpi al centro della terra, secondo la legge dell'attrazione universale (pag. 31), ma per le ordinarie altezze di caduta, non superiori a 1000 metri, tale variazione è così piccola che diviene trascurabile, per la grande distanza del centro della terra, che è più di 6 milioni di metri (il raggio medio della terra è circa 6 366 000 *m.*).

Quindi, per piccole altezze di caduta, la gravità si può considerare come forza continua costante, e gli incrementi di velocità che essa comunica ai corpi nei successivi minuti secondi della loro caduta si possono, senza errore sensibile, ritenere eguali. Perciò basta conoscere la velocità che la gravità comunica ai corpi liberamente cadenti in 1 secondo, per avere quella che essa comunica in 2, 3, ecc., secondi.

Ora tale velocità, come vedremo, viene determinata colla massima esattezza, mediante il pendolo, il quale fa conoscere che essa è di 9,8088 *m.* alla latitudine di 45°, e al livello del mare. Questo numero, come si vede, è assai prossimo a 10 *m.* Pertanto ritenendo, per semplicità, che la detta velocità sia = 10 *m.* per secondo, consegue che la velocità di un corpo liberamente cadente

dopo	1	secondo	è	10×1 *m.*
»	2	secondi	»	10×2 »
»	3	»	»	10×3 »
»	*t*	»	»	$10 \times t$ »,

cioè che *essa cresce in proporzione della durata della caduta*, la quale proposizione costituisce la 2ª legge della caduta dei gravi.

3. Accelerazione. — La velocità costante di 9,8088 m., o prossimamente 9,81 *m.*, che la gravità comunica ai corpi liberamente cadenti ad ogni secondo si chiama *accelerazione*. Essa varia, come vedremo, col variare della gravità, cioè colla latitudine ed altitudine, e si indica in generale colla lettera *g*.

4. Formola della velocità. — Rappresentando adunque colla lettera *g* l'*accelerazione*, è evidente che la velocità che la gravità comunica al corpo cadente in *t* secondi è *t* volte maggiore, e perciò è espressa dal prodotto *gt*. Quindi rappresentando colla lettera *v* tale velocità generata nel tempo *t*, si ha l'eguaglianza:

$$v = gt.$$

Questa formola nella quale il fattore *g* è costante per un medesimo luogo esprime la legge enunciata sopra.

5. Formola dello spazio percorso da un corpo liberamente cadente. — Si dimostra razionalmente che lo spazio, contato dal principio del moto, percorso da un grave liberamente cadente nel tempo *t* in un luogo ove l'accelerazione di gravità è *g*, è dato dalla eguaglianza:

$$s = \frac{1}{2} gt^2.$$

Perciò lo spazio percorso:

$$\text{in 1 secondo è: } \frac{g}{2} \times 1,$$

$$\text{in 2 secondi è: } \frac{g}{2} \times 4,$$

$$\text{in 3 » } \frac{g}{2} \times 9,$$

ossia: *gli spazi percorsi da un corpo liberamente cadente nei tempi trascorsi dal principio del suo moto sono proporzionali ai quadrati dei tempi.*

Inoltre gli spazi percorsi separatamente nei successivi secondi sono:

$$\text{nel 1° secondo: } \frac{g}{2} \times 1 = \frac{g}{2} \times 1,$$

$$\text{» 2° » } \frac{g}{2} \times (4-1) = \frac{g}{2} \times 3,$$

$$\text{» 3° » } \frac{g}{2} \times (9-4) = \frac{g}{2} \times 5,$$

ossia: *gli spazi percorsi da un corpo liberamente cadente nei successivi minuti secondi, separatamente l'uno dall'altro, crescono come la serie dei numeri dispari.*

6. Dimostrazione diretta della formola che esprime lo spazio percorso nel tempo t. — L'importante formola dello spazio percorso nel tempo t (pag. 71) si può dimostrare osservando che al principio della caduta libera il corpo ha la velocità o, e alla fine del tempo t ha la velocità $v = gt$ (pag. 71). E siccome la sua velocità è cresciuta uniformemente nel tempo t da $v = o$ a $v = gt$, alla metà di questo tempo essa era la media $\frac{o+gt}{2} = \frac{gt}{2}$, e di quanto in un dato istante dopo la metà eccedeva questo valore medio, di altrettanto ne era minore in un istante prima della metà ad uguale distanza di tempo. Ora lo spazio percorso con questa velocità uniformemente crescente da o a gt è precisamente eguale a quello che avrebbe percorso movendosi con moto uniforme, ossia con velocità costante eguale alla media $\frac{gt}{2}$.

Quindi lo spazio percorso nel tempo t con velocità uniformemente crescente da $v = o$ a $v = g\,t$, si può esprimere colla formola $s = v\,t$ del moto uniforme (pag. 23), sostituendo in questa a v la velocità media $\frac{g\,t}{2}$, e così si ha:

$$s = \frac{g\,t}{2}\,t = \frac{g\,t^2}{2}.$$

7. Dimostrazione sperimentale delle leggi della caduta dei gravi colla macchina di Atwood. — L'apparecchio che si usa di preferenza nelle scuole per dimostrare sperimentalmente le leggi della caduta dei gravi è la macchina di Atwood (fig. 36).

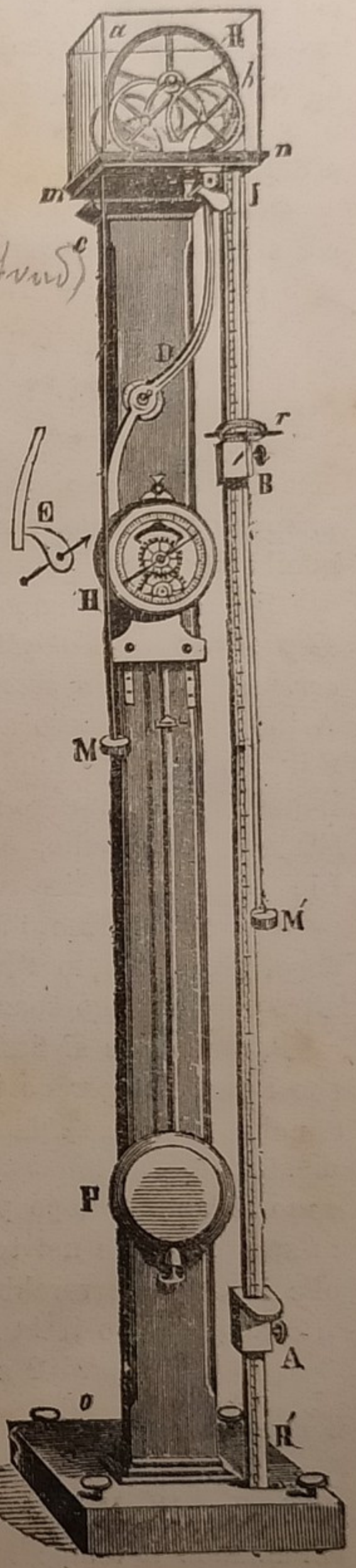


Fig. 36.

Essa consta di una colonna verticale di legno ($c\,o$), alta circa due metri, munita superiormente di una piattaforma ($m\,n$) su cui posa una carrucola (R) mobilissima sul suo asse, sulla cui scanalatura passa un sottile e pieghevole filo di seta non torta, alle cui estremità sono appesi due pesi eguali (M, M'), cui se n'aggiunge un altro per metterli in moto nell'istante che si vuole, il che si ottiene mediante una leva (D); di fianco alla colonna evvi un regolo verticale di legno ($l\,R'$), diviso in centimetri, al quale si possono fissare a vite un piatto (A) od un anello (B); infine si misurano i tempi mediante un pendolo (P) a secondi, che può essere fisso alla colonna, ovvero separato.

Trascurando il peso del filo perchè piccolissimo, e le resistenze dell'attrito e dell'aria, perchè la prima è piccolissima, e la seconda, quando si tratta di corpi molto densi come i metalli, e di velocità non grandi, è pure insensibile, i due dischi metallici, o restano immobili a qualunque altezza, ovvero, se hanno ricevuto una spinta, si muovono in senso contrario con moto uniforme, e si trovano nelle stesse condizioni come se non fossero soggetti ad alcuna forza. Se poi si aggiunge un peso ad uno dei dischi agirà su tutto il sistema una forza continua costante rappresentata da quel peso, ed esso acquisterà un moto uniformemente accelerato. Supponiamo che i pesi dei due dischi sieno, ad es., di 25 grammi l'uno, e che si aggiunga all'un di essi un peso di 5 grammi; questo fa discendere un disco ed ascendere l'altro; ma la forza che fa muovere il peso di 5 grammi, quando cade liberamente, dovendo far ora muovere una massa undici volte maggiore

$(25+25+5=55=5\times11)$, comunicherà alla medesima una velocità 11 volte minore, perchè (come vedremo nella misura dinamica delle forze a pag. 90) *a parità di forza le accelerazioni sono in ragione inversa delle masse.* Ma il movimento è sempre della stessa natura, perchè sempre prodotto da una forza continua costante, rappresentata dal peso addizionale 5 *gr.* Nel fatto la velocità è ancora minore, causa le resistenze dell'attrito e dell'aria.

Ora, per mezzo del pendolo a secondi e del regolo verticale graduato, cui si fissa successivamente il piatto alle altezze ove giunge il peso in 1, 2, 3 ecc. secondi, si riconosce che

se in 1ˢ i pesi percorrono			20×1 *cm.*,
in 2ˢ	»	»	$80=20\times4$ »
in 3ˢ	»	»	$180=20\times9$ »

cioè che *gli spazi sono proporzionali ai quadrati dei tempi contati dal principio del moto*, che è la legge fondamentale, perchè include anche quella degli spazi parziali (pag. 72).

Di particolare importanza è poi la dimostrazione diretta della legge: *lo spazio percorso dal corpo nel 1° secondo è la metà di quello che esso percorre in un altro secondo colla velocità che ha alla fine di questo tempo.* A tale scopo il peso addizionale (5 *gr.*) riceve la forma di una verghetta (*r*) e si fissa, alla fine dello spazio (20 *cm.*) che i pesi percorrono in 1ˢ, l'anello (B), il quale arresta il peso addizionale dopo 1ˢ, e il piatto (A) a distanza doppia (40 *cm.*) dall'anello, ossia tripla (60 *cm.*) dal punto di partenza dei pesi. Indi si fanno partire questi, e si riconosce che mentre nel 1° secondo essi percorrono con moto uniformemente accelerato un dato spazio, (20 *cm.*), dopo, senza il peso addizionale, cioè per la sola inerzia, percorrono in un altro secondo uno spazio doppio (40 *cm.*).

Parimenti se si fissa l'anello (B) alla fine dello spazio ($20\times4=80$ *cm.*) che i pesi percorrono in 2ˢ, e il piatto (A) a distanza doppia (160 *cm.*) dall'anello. ovvero: se la colonna e il regolo non sono abbastanza lunghi, a distanza uguale (80 *cm.*) dall'anello, si riconosce che mentre i pesi in 2ˢ giungono all'anello, dopo percorrono senza il peso addizionale, per sola inerzia, lo spazio eguale nel tempo metà, cioè in un solo secondo, d'onde si deduce che in 2ˢ percorrerebbero spazio doppio.

Dunque dopo il 1° secondo la velocità è 40 *cm.*

» » 2 secondi » $40\times2=80$ *cm.*, ecc.

il che dimostra anche la legge: *la velocità cresce in proporzione col tempo* (pag. 71).

8. Corollarii delle leggi della caduta dei gravi. — *Corollario 1°.* — Eliminando il tempo t dalle due note formule (pag. 71).

$$v=g\,t,$$

$$s=\frac{1}{2}g\,t^2,$$

si ricava:

$$s = \frac{v^2}{2g},$$

donde:

$$v = \sqrt{2gs},$$

la quale esprime che: *le velocità sono direttamente proporzionali alle radici quadrate degli spazi.* Tale formula serve a calcolare la velocità mediante lo spazio.

Corollario 2°. — Ricavando il valore di t dalla formula $s = \frac{1}{2}gt^2$ si ha:

$$t = \sqrt{\frac{2s}{g}},$$

la quale esprime che: *i tempi delle cadute sono direttamente proporzionali alle radici quadrate degli spazi.*

La detta formula serve a calcolare t mediante il valore di s.

9. Caduta d'un corpo cui viene comunicata una velocità iniziale. — Se al corpo che cade viene comunicata una velocità iniziale u nella direzione della gravità, questa velocità, per inerzia, si somma con quella gt che nel tempo t gli comunica la gravità, e perciò la sua velocità v dopo il tempo t è:

$$v = u + gt.$$

E lo spazio s che esso percorre nel tempo t è manifestamente la somma di quello $u\,t$ che esso percorrerebbe in questo tempo per inerzia, e quindi con moto uniforme, in virtù della velocità iniziale u, con quello $\frac{g}{2}t^2$ che nello stesso tempo gli fa percorrere la gravità; perciò si ha;

$$s = u\,t + \frac{g}{2}t^2.$$

§ 26. Ascesa verticale dei gravi.

1. Formola della velocità. — Perchè un corpo salga deve essere spinto dal basso in alto con una velocità iniziale, che indicheremo colla lettera u. Ora siccome questa viene ad ogni secondo diminuita dalla gravità della quantità g, cioè del valore dell'accelerazione, è chiaro che la velocità v del corpo dopo t secondi, è

$$v = u - gt \qquad \ldots\ldots (1),$$

dalla quale si vede che: *la velocità di un corpo che sale decresce in proporzione del tempo*, e di quanto cresce nella discesa, cioè del valore dell'accelerazione.

2. Formola dello spazio. — Come la velocità del corpo che sale dopo il tempo t è eguale alla differenza fra la velocità iniziale u e la velocità gt che in questo tempo gli sottrae la gravità, così è evidente che lo spazio s percorso nel tempo t è la differenza fra lo spazio ut che il corpo percorrerebbe in questo tempo con moto uniforme, per la velocità iniziale u, e lo spazio $\frac{g}{2}t^2$ che nello stesso tempo gli sottrae la gravità, cioè è:

$$s = ut - \frac{1}{2}gt^2 \qquad \ldots (2).$$

3. Durata e altezza della salita. — Si presenta ora la domanda: *quale è la durata e l'altezza della salita?*

Per trovare la durata basta osservare che il corpo sale finchè la sua velocità è nulla. Quindi per averne il valore si deve porre $v = 0$ nella formola

$$v = u - gt,$$

che diviene

$$0 = u - gt,$$

donde si ricava:

$$t = \frac{u}{g}.$$

Ora questo tempo è precisamente eguale a quello della durata della caduta di un corpo che nel cadere abbia acquistato quella velocità iniziale u. Infatti dalla formola

$$v = gt,$$

che esprime la velocità acquistata nel tempo t della caduta libera, si ricava $t = \frac{v}{g}$, valore che coincide col precedente $t = \frac{u}{g}$, se $v = u$.

L'ottenuta formula, nella quale il fattore g per uno stesso luogo è costante, dimostra che *la durata della salita è proporzionale alla velocità iniziale* u.

Per trovare l'altezza della salita basta cercare mediante la formola (pag. 76).

$$s = ut - \frac{g}{2} t^2,$$

lo spazio che il corpo percorre nel tempo $t = \frac{u}{g}$, in cui esso sale

Perciò si sostituisce tale valore nella formola precedente e si ottiene:

$$s = \frac{u^2}{2g}.$$

Ora si deve osservare che questa formola $s = \frac{u^2}{2g}$ che esprime l'altezza s a cui arriva un corpo che ha una velocità iniziale u, coincide colla formola $s = \frac{v^2}{2g}$ che esprime lo spazio percorso da un corpo cadente nell'acquistare la velocità v (pag. 75), perchè se si suppone $v = u$, il valore di s diviene eguale.

Quindi risulta che: *un corpo spinto dal basso in alto con una data velocità iniziale sale a quella stessa altezza da cui deve cadere per acquistare la stessa velocità.*

Dalla formola $s = \frac{u^2}{2g}$, nella quale il fattore g in uno stesso luogo è costante, risulta ancora che l'*altezza a cui arriva un grave spinto verticalmente in alto è proporzionale al quadrato della sua velocità iniziale.*

4. Tempo della salita e della discesa. — Raggiunta la massima altezza il corpo si arresta un istante e poi ricade. Per avere il tempo da esso impiegato nel ritornare al punto di partenza, ossia nel salire e discendere, basta osservare che quando il corpo è ritornato al detto punto la sua distanza s del medesimo è $= 0$. Ora ponendo $s = 0$ nella formola dello spazio

$$s = ut - \frac{g}{2} t^2,$$

si ottiene:

$$0 = ut - \frac{g}{2} t^2,$$

dalla quale (ordinando) si ha:

$$t^2 - \frac{2u}{g} t = 0.$$

Risolvendo questa equazione di 2° grado rispetto a t, si ha:

$$t = \frac{u}{g} \pm \sqrt{\frac{u^2}{g^2}} = \frac{u}{g} \pm \frac{u}{g},$$

donde:

$$t' = \frac{2u}{g},$$

$$t'' = 0.$$

Il 2° valore, $t'' = 0$, corrisponde al principio della salita, essendo allora $s = 0$; e il 1° valore, $t' = \frac{2u}{g}$, corrisponde all'istante cercato, in cui il corpo è ritornato al punto di partenza. Siccome $t' = \frac{2u}{g}$, tempo della salita e della discesa, è precisamente doppio di $t = \frac{u}{g}$ che è il tempo della salita (pag. 76) consegue che: *il tempo della salita è eguale a quello della discesa.*

5. Velocità con cui il corpo ritorna al punto di partenza. — Infine per avere la velocità del corpo alla fine del tempo $t' = \frac{2u}{g}$ dopo il quale esso è ritornato al punto di partenza, si deve sostituire il precedente valore di t nella formola della velocità $v = u - gt$ (pag. 75), e così si ottiene;

$$v = -u.$$

Ciò significa che: *la velocità del corpo quando è ritornato al punto di partenza è eguale e contraria alla sua velocità iniziale.*

6. Riassunto. — Dalle precedenti deduzioni risulta il seguente.

Teorema: fatta astrazione della resistenza dell'aria, un corpo verticalmente gettato in alto sale appunto tanto tempo quanto esso impiega poi a ritornare al punto di partenza: l'altezza a cui arriva è eguale a quella da cui discende durante lo stesso tempo; e la velocità che acquista nel discendere è eguale a quella che gli è stata tolta nel salire per egual tempo, cioè è la sua velocità di partenza.

Quindi, fatta astrazione della resistenza dell'aria, una palla da schioppo spinta verticalmente in alto ritorna al punto di partenza colla stessa velocità che aveva nel partire; ed eserciterebbe perciò lo stesso effetto contro un ostacolo.

§ 27. Moto uniformemente vario.

1. Definizioni. — Un moto analogo a quello ora definito per i gravi cadenti liberamente, o lanciati verticalmente in basso, o lanciati verticalmente in alto, chiamasi in genere *uniformemente vario*, perchè la velocità cresce o diminuisce di una quantità costante ad ogni unità di tempo; nel caso dell'accrescimento dicesi *uniformemente accelerato*, nel caso della diminuzione *uniformemente ritardato*. Chiamasi poi *accelerazione: la variazione costante che subisce la velocità ad ogni unità di tempo*, la quale si considera come positiva *(accelerazione)* o negativa *(ritardazione)*, secondochè è un accrescimento od una diminuzione.

2. — Le **formole** che servono a risolvere questioni attinenti al moto uniformemente vario sono quindi identiche a quelle già dimostrate ed esemplificate per il caso del moto dei gravi. Però si usa distinguerle indicando in esse colla lettera a l'accelerazione che prima era indicata con g perchè si trattava allora di una accelerazione speciale, quella della gravità.

Pertanto tali formole sono:

$$v = u \pm at,$$

$$s = ut \pm \frac{1}{2} at^2,$$

ove u rappresenta la velocità iniziale, a l'accelerazione, v la velocità dopo il tempo t ed s lo spazio percorso in questo tempo, ed ove il segno + riguarda il caso del moto uniformemente accelerato, il segno − quello del ritardato.

Se poi è $u = o$ allora;

$$v = at,$$

$$s = \frac{1}{2} at^2.$$

§ 28. Composizione e scomposizione dei movimenti.

1. Moto composto. — Generalmente i corpi posseggono contemporaneamente due o più movimenti.

Per es. una barca che attraversa un fiume ha un movimento composto dei due movimenti che le comunicano la spinta della corrente e quella del rematore. Un corpo cadente da una vettura in moto ha due movimenti: quello della vettura e quello che gli comunica la gravità; così pure una pietra lanciata, od un proiettile, ha due movimenti: quello della spinta e quello della gravità. I corpi celesti hanno un moto curvilineo attorno ad un centro, il quale risulta da un moto progressivo, per cui procederebbero per inerzia in linea retta, e da un moto prodotto dalla gravitazione, pel quale continuamente sono deviati dalla direzione rettilinea secondo la quale tendono a muoversi per inerzia. Ogni corpo che si muove alla superficie della terra ha un moto composto da quello proprio e da quelli del globo terrestre.

Come si denomina (pag. 38): *risultante di due o più forze: la forza che produce lo stesso effetto di due o più altre*, così il movimento che assume un corpo per l'effetto di due o più movimenti posseduti contemporaneamente dal medesimo, denominasi *moto risultante* o *composto*, mentre i movimenti che concorrono a produrre quello risultante diconsi *componenti*.

E così pure, la velocità od accelerazione (secondochè il corpo si muove per inerzia, o per l'azione di forze continue) che assume un corpo per la coesistenza nel medesimo di due o più velocità od accelerazioni si dice *velocità* od *accelerazione risultante*. E

le velocità od accelerazioni che concorrono a produrre quella risultante chiamansi *velocità* od *accelerazioni componenti*.

Comporre due o più movimenti, o due o più velocità od accelerazioni, significa determinare il movimento, o la velocità od accelerazione risultante, ed inversamente: *scomporre un movimento od una velocità od accelerazione*, significa: *determinare le componenti*.

2. Principio dell'indipendenza degli effetti delle forze. — Nel considerare l'azione della gravità sui corpi si è detto (pag. 70), che l'azione di essa nel 2° istante, in cui il corpo possiede già la velocità acquistata nel 1° istante, è identica a quella da essa prodotta in questo, al principio del quale il corpo possedeva la velocità zero. Il fatto si verifica non solo per la gravità, ma per qualunque forza e costituisce il principio detto dell'*indipendenza degli effetti delle forze*, enunciato dapprima da Galilei, nei seguenti termini: *l'azione di una forza sopra un corpo è indipendente dallo stato di riposo o di movimento del medesimo*. Esso può essere chiarito con esempi, come nel caso della gravità, ma non dimostrato *a priori*, come non si dimostrano gli assiomi. La dimostrazione del medesimo risulta *a posteriori*, dall'accordo mirabile fra le conseguenze che se ne deducono ammettendolo vero, ed i risultati delle esperienze ed osservazioni.

3. Corollario. — Dal detto principio risulta che:

1° *Una forza continua costante produce sul corpo su cui agisce un moto uniformemente accelerato*, perchè

nel tempo 1 produce la velocità a,
» 2 » » $2a$,
» 3 » » $3a$,
» t » » $v = at$.

4. Composizione e scomposizione dei movimenti diretti secondo la stessa linea. — Nello studio della caduta e ascesa verticale dei gravi (pag. 75), si è detto che se ad un corpo libero si comunica una velocità iniziale u, essa si somma con quella che gli comunica la gravità, permodochè la sua velocità dopo il tempo t, sarà $v = u \pm gt$, secondochè la velocità comunicatagli ha la stessa direzione della gravità, o direzione contraria.

Generalmente: *se un corpo ha contemporaneamente due o più velocità od accelerazioni secondo la stessa linea retta, la velocità od accelerazione risultante è la somma o la differenza delle velocità od accelerazioni componenti, secondochè queste sono dirette nello stesso senso o in senso contrario.*

Inversamente, una velocità od accelerazione si può scomporre in due o più velocità od accelerazioni dirette secondo la stessa linea retta.

5. Composizione e scomposizione dei movimenti concorrenti. — Consideriamo, per es., una nave che si muove nella direzione AX (fig. 17, pag. 41), mentre un corpo collocato su di essa si muove contemporaneamente nella direzione AY. Siano AB, AC gli spazi che il corpo percorre contemporaneamente pel moto della nave e pel moto proprio. Siccome nel tempo in cui esso percorre lo spazio AB, perchè partecipa al moto della nave, percorre ancora sulla linea AY, che è trasportata parallelamente a se stessa sulla nave, lo spazio BD = AC, pel moto proprio, è chiaro che alla fine del tempo in cui avvengono i due moti, si troverà in D.

Siccome BD è parallela ed eguale ad AC, così ACDB è un parallelogrammo, formato sulle rette AB, AC.

Quindi risulta la seguente regola:

Per determinare il punto in cui si trova un corpo che ha due movimenti le cui direzioni fanno un angolo, basta costrurre un parallelogrammo sulle rette condotte dal punto di partenza al punto in cui arriverebbe il corpo in uno stesso tempo in ciascun movimento.

La regola vale qualunque sia l'angolo delle direzioni dei due movimenti, e qualunque sia la natura di ciascun movimento; però secondochè i due movimenti sono ambidue uniformi, od ambidue uniformemente varii, o no, il corpo può venire da A in D seguendo la diagonale AD o no, come vedremo nei paragrafi seguenti.

Detta regola costituisce il *principio della composizione dei movimenti*, stabilito da Galilei mediante l'osservazione dei fenomeni di moto, il quale si denomina anche: *principio della sovrapposizione nei movimenti*, o dell'*indipendente coesistenza* di più movimenti, il quale si enuncia nei seguenti termini: *se un punto materiale, perfettamente libero, è sollecitato a muoversi in varie*

direzioni, esso si muoverà in modo da trovarsi alla fine di un tempo qualunque t, *in quel punto dello spazio in cui si troverebbe se si fosse mosso successivamente e durante quel tempo in quelle differenti direzioni.*

6. Prove sperimentali. — Molte sono le prove sperimentali dell'enunciato teorema del parallelogrammo dei movimenti.

Ogni barcaiuolo lo applica per esperienza, quando vuole traversare un fiume e raggiungere un punto qualunque della opposta riva. Per es., se vuole andare da A in D (fig. 37), non spinge la barca nella direzione AD, ma bensì nella direzione del lato AC, del parallelogrammo ABDC.

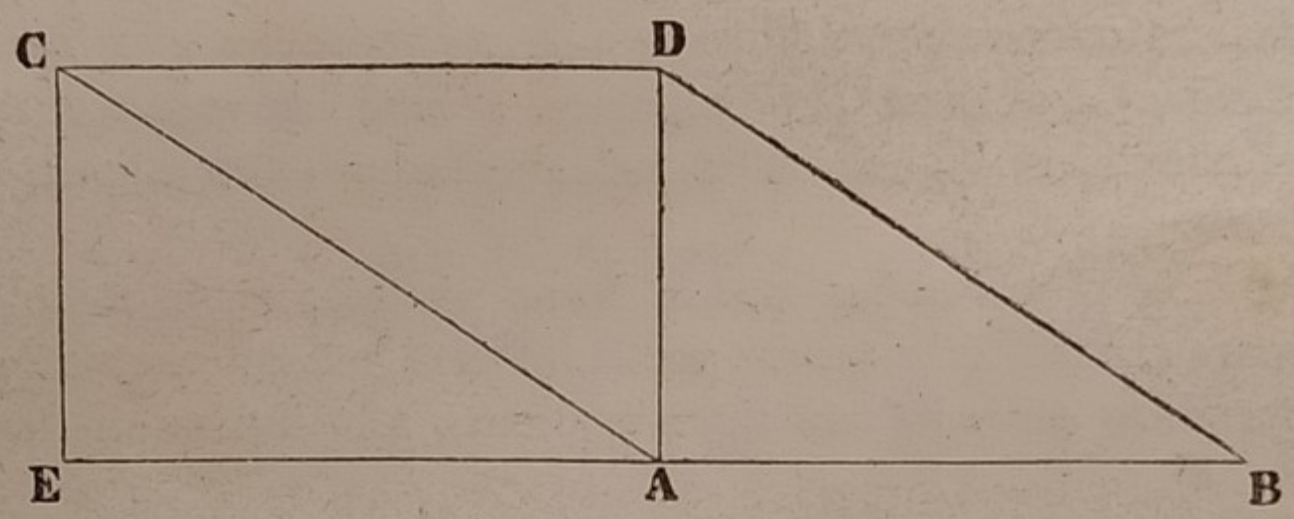


Fig. 37.

Nel teatro si usa talvolta la *volata* per fare discendere obliquamente oggetti dall'alto del palco scenico, imitando il volo. L'oggetto, che può anche essere una persona, pende da una fune che, mediante opportuno artifizio, riceve contemporaneamente il movimento in direzione verticale ed orizzontale, cosicchè esso discende in direzione obliqua intermedia.

Infine, si può ancora illustrare il teorema precedente col seguente *esperimento:* ad un angolo di una tavola si dispongono due molle, o due martelli di sughero con manubrio elastico, per es. di osso di balena, così applicati che si possono far battere ambidue ad un tempo contro una palla giacente innanzi a loro sul tavolo. Poscia si fa primieramente battere l'un martello contro la medesima, ed essa si muove nella direzione che le dà quello lungo un lato della tavola; se si fa battere solo il secondo martello contro la palla, essa corre lungo l'altro lato della tavola; ma se si fa urtare la palla da entrambi i martelli ad un tempo, essa si muove in una direzione la quale giace fra quelle dei due movimenti ricevuti dalla medesima.

La direzione del moto della palla giace esattamente frammezzo le direzioni dei movimenti che le dànno i due martelli, se essi comunicano alla medesima eguale velocità. Ma se uno dei martelli le comunica velocità maggiore dell'altro, allora la palla segue una direzione più vicina a quella della velocità maggiore, perchè la diagonale di un parallelogrammo è sempre più vicina al lato più lungo.

7. Fenomeni relativi. — Su di un battello in moto una persona può giuocare alla palla, come a terra; cioè, se getta la palla verticalmente in alto, la riceve nel punto di partenza sul battello, quantunque nel frattempo dell'ascesa e della discesa, questo si sia spostato, il che avviene, perchè la palla conserva il moto orizzontale del battello assieme col proprio moto verticale; ma un osservatore collocato a terra vedrebbe che realmente la palla si solleva e si abbassa obliquamente, secondo la regola del parallelogrammo dei movimenti, quantunque al giuocatore essa appaia muoversi verticalmente.

Così pure una pietra abbandonata da un viaggiatore in moto su di una ferrovia, appare al medesimo cadere verticalmente; ma un osservatore esterno la vede discendere secondo una linea inclinata allo innanzi nella direzione del moto.

Nè solo i moti reali, ma anche i moti apparenti dei corpi, si compongono fra loro e coi moti reali, secondo la regola enunciata. Così le goccie di pioggia cadenti verticalmente, quando noi ci moviamo in una direzione ci appaiono cadere inclinate verso la parte da cui ci allontaniamo, perchè se noi ci muoviamo a sinistra di una goccia (C, fig. 37), questa acquista un moto apparente in senso contrario (da C verso D), il quale si compone col movimento verticale (C E) che essa possiede e dà luogo ad un movimento risultante (C A) obliquo nel senso indicato.

8. Poligono dei movimenti. — Quando i movimenti componenti sono più di due, la costruzione da farsi è quella stessa del *poligono delle forze* (pag. 45), che allora diviene il *poligono dei movimenti*, e quando il poligono si chiude è segno che il movimento risultante è nullo, ovvero che i movimenti componenti si fanno equilibrio.

9. Composizione e scomposizione dei movimenti rettilinei ed uniformi. — Se un punto A (fig. 38) ha nella direzione AX un moto uniforme colla velocità A 1, esso percorrerà in tale direzione

nei tempi	1,	2,	3,	. . .
gli spazi	A 1,	A 2 = A 1 × 2,	A 3 = A 1 × 3,	. . .

e se nella direzione AY, ad angolo qualunque colla AX, ha pure un moto uniforme con un'altra velocità, metà ad esempio della precedente, esso percorrerà in tal direzione negli stessi tempi gli spazii A1′, A2′, ecc., metà dei precedenti. E per la composizione dei movimenti si troverà alla fine dei detti tempi alle estremità B, C, D, ecc., delle diagonali dei parallelogrammi costruiti sulle rette che rappresentano gli spazi percorsi pei moti componenti.

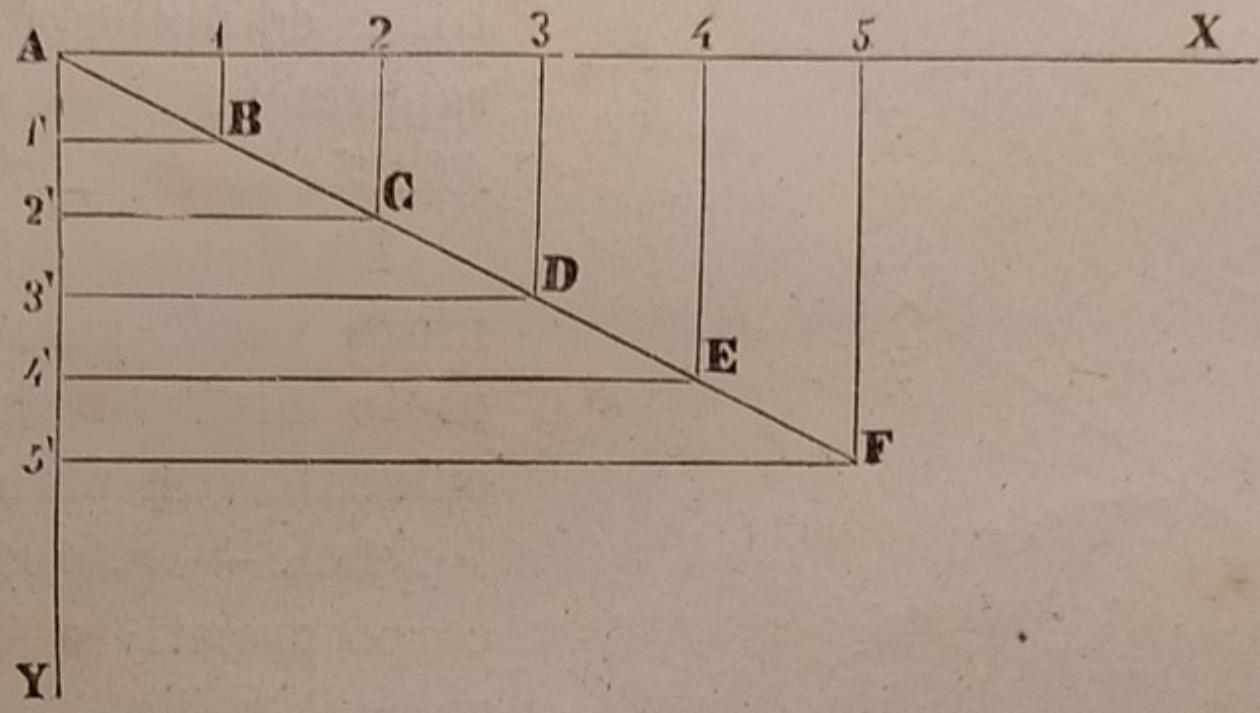


Fig. 38.

Ora i triangoli AB1, AC2, AD3, ecc., essendo simili, per avere gli angoli 1, 2, 3, ecc., eguali compresi fra i lati A1, B1; A2, C2, ecc., proporzionali, debbono avere eguale l'angolo in A, e per conseguenza i punti B, C, D, ecc., debbono trovarsi sulla stessa linea retta, cioè:

1° *Il moto risultante è rettilineo.*

Di più essendo $A2 = A1 \times 2$, $A3 = A1 \times 3$, ecc.

sarà pure $AC = AB \times 2$, $AD = AB \times 3$, ecc., cioè:

2° *Il moto risultante è uniforme, e la velocità è rappresentata da* AB.

E siccome il ragionamento esposto si può applicare a ciascuna delle più piccole frazioni eguali in cui si può concepire divisa l'unità di tempo, risulta il seguente teorema: *Se un corpo ha contemporaneamente due movimenti rettilinei ed uniformi, il suo moto risultante è parimente rettilineo ed uniforme; la velocità e traiettoria risultanti sono rappresentate in gran-*

dezza e in direzione dalla diagonale del parallelogrammo costruito sulle rette che rappresentano le velocità e traiettorie componenti.

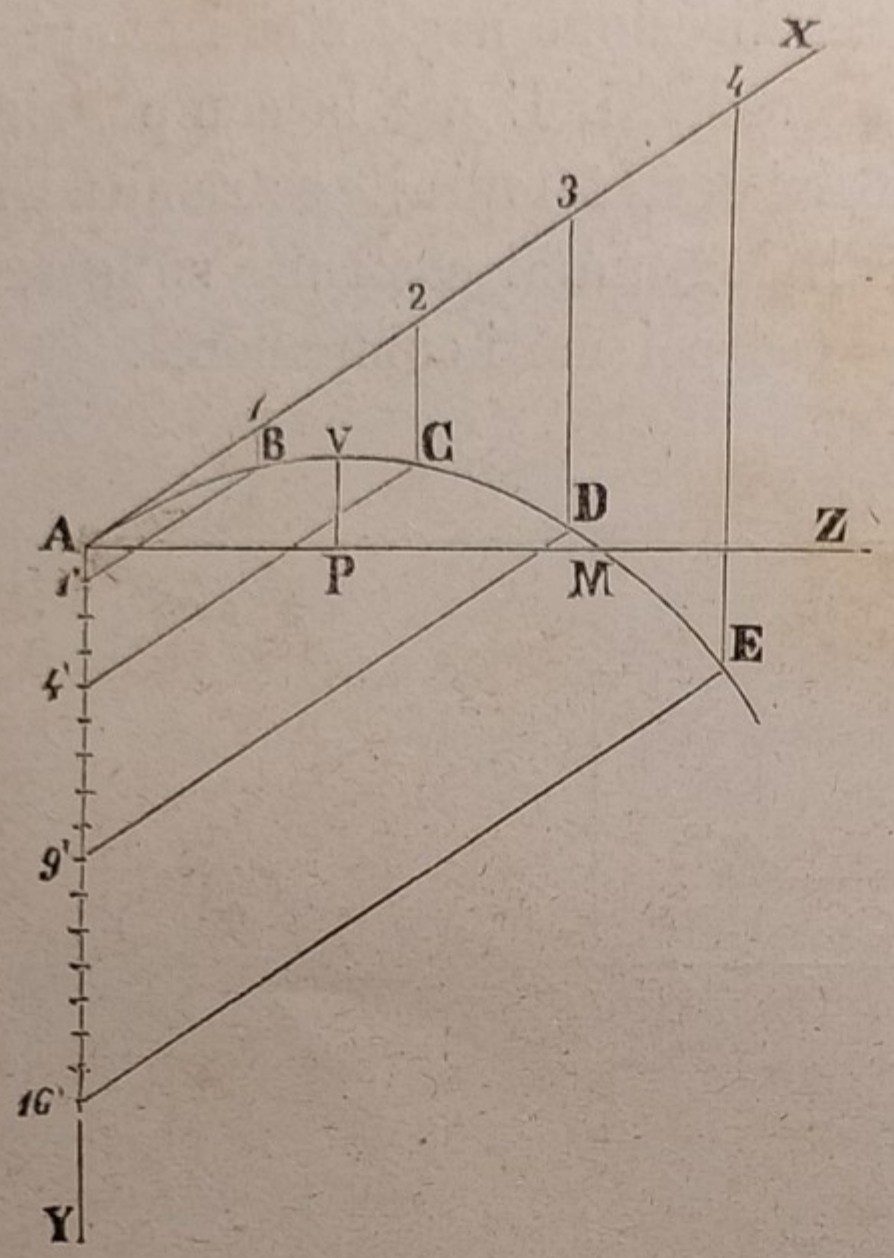


Fig. 39.

Inversamente, un moto uniforme e rettilineo rappresentato da una retta ABCDEF può essere scomposto in due movimenti rettilinei ed uniformi ad angolo, rappresentati dalle rette A12345, A 1′2′3′4′5′.

10. Composizione di un moto uniforme con un moto uniformemente accelerato con direzioni differenti. — Supponiamo un corpo proiettato nella direzione AX (fig. 39) colla velocità A1. Se esso non fosse soggetto alla gravità, si muoverebbe in tale direzione con moto uniforme e percorrerebbe

nei tempi 1^s, 2^s, 3^s, 4^s, ecc.,
gli spazi A 1, A 2 = A 1 × 2, A 3 = A 1 × 3, A 4 = A 1 × 4, ecc.:

ma la gravità gli fa percorrere nei detti

tempi	1^s,	2^s,	3^s,	4^s,	ecc.,
gli spazi	5 × 1,	5 × 4,	5 × 9,	5 × 16,	ecc.,
rappresentati da	A1′,	A4′,	A9′,	A16,	ecc.,

perciò esso alla fine di quei tempi si trova

nei punti	B,	C,	D,	E,	ecc.,

estremità delle diagonali dei parallelogrammi che hanno per lati gli spazi percorsi dal corpo pei due movimenti.

In questo caso i parallelogrammi AB, AC, AD, ecc., hanno bensì ancora gli angoli eguali, ma non i lati proporzionali; perciò

non sono simili; così pure non sono simili i triangoli AB1, AC2, AC3, ecc., e perciò la traiettoria non è una linea retta; ma una curva, passante pei punti A, B, C, D, E, e i tratti AB, BC, ecc., non sono eguali.

E siccome le distanze B1, C2, D3, E4, dette *ordinate*,
stanno come i n^{i} quadrati 1, 4, 9, 16,

mentre le distanze B1′, C4′, D9′, E16′, dette *ascisse*,
stanno come i n^{i} successivi 1, 2, 3, 4,

perciò questa curva in cui *le ordinate stanno fra loro come i quadrati delle ascisse* è quella che i geometri chiamano *parabola*, siccome insegna la geometria analitica.

Dunque: *Se un corpo ha due movimenti rettilinei ad angolo, uno dei quali è uniforme e l'altro uniformemente accelerato, il moto risultante è curvilineo e vario. La traiettoria risultante è una curva che i geometri chiamano parabola, e il moto si dice parabolico.*

11. Moto dei proiettili. — Il detto movimento è quello dei proiettili lanciati obliquamente alla direzione della gravità, fatta astrazione dalla resistenza dell'aria.

Se la direzione del tiro è orizzontale, allora la curva discende subito verso il basso, cioè ha un solo ramo, che è discendente. Se invece la direzione del tiro è verso l'alto, allora la curva ha due rami, uno ascendente, l'altro discendente. Essi sarebbero simmetrici rispetto alla verticale passante pel punto culminante (V) se non fosse della resistenza dell'aria, la quale diminuisce continuamente la velocità iniziale del corpo; perciò le dimensioni della curva nella direzione del tiro divengono sempre minori, e così il suo ramo discendente è più ricurvo di quello ascendente.

Tuttavia la forma della curva descritta dal corpo per la resistenza dell'aria si può anche determinare, introducendo nel calcolo la legge di tale resistenza. Tali curve che diconsi *balistiche* hanno la massima importanza nell'artiglieria.

Dicesi *ampiezza* o *portata* del tiro la distanza (A M) dal punto di partenza (A) del proiettile al punto (M) in cui la parabola interseca la retta orizzontale (A Z) condotta pel punto di partenza. L'elevazione (V P) del punto culminante o vertice (V) della curva sull'orizzontale (A Z) passante pel punto di partenza dicesi *altezza della parabola*.

Entrambe queste quantità dipendono dall'angolo di elevazione (X A Z) e dal rapporto tra la velocità (A 1) del moto uniforme e l'accelerazione (2 A 1′) del moto uniformemente accelerato.

Senza la resistenza dell'aria, la massima ampiezza, con una data velocità, si ottiene quando la direzione della proiezione è di 45° coll'orizzonte.

La forma della parabola descritta da un proiettile dipende pertanto dalla velocità della proiezione e dalla direzione del tiro.

Quindi si intende come la traiettoria di un proiettile discostandosi sempre più dalla direzione del tiro, per colpire un punto è necessario mirare tanto più in alto quanto maggiore ne è la distanza e quanto minore è la velocità del proiettile, e l'uso del traguardo nelle armi da tiro (*).

12. Perturbazioni causate dalla resistenza dell'aria. — La resistenza dell'aria come altera più o meno le leggi della caduta e ascesa verticale dei gravi, così altera pure più o meno le leggi del moto parabolico dei proiettili spinti obliquamente alla verticale. L'osservazione dimostra che se il moto non è troppo rapido, nè troppo lento, la resistenza di un corpo gasoso è proporzionale alla densità del gas o al quadrato della velocità del mobile. Perciò la sua influenza è minima negli zampilli d'acqua, in cui è piccola la velocità, ed è grande invece nei proiettili in cui è grande la velocità, ed è la causa per cui lo *sparo di massima portata* di un cannone si ottiene coll'angolo di elevazione a 44° invece di 45°.

13. Altri esempi di moto parabolico. — Fatta astrazione della resistenza dell'aria, descrivono una parabola nel venire a terra, la pietra gettata col braccio o colla fionda, i proiettili lanciati dalle armi a fuoco, le valanghe e le acque che balzano pei dirupi, l'acqua che esce tranquilla da un foro praticato nella parete laterale di un recipiente, i razzi che nel salire deviano più o meno dalla verticale.

Così pure un corpo cadente dall'albero di una nave, ovvero da un convoglio in moto, non segue la verticale del punto di partenza, ma una linea curva parabolica intermedia tra la direzione della velocità verticale che gli comunica la gravità, e quella della velocità orizzontale posseduta dal corpo prima della sua caduta.

(*) I getti d'acqua orizzontali presentano esempi di parabola con un solo ramo, come pure ogni proiettile spinto orizzontalmente. Invece gli zampilli non verticali presentano esempi di parabole con 2 rami, e così pure i razzi.

Mediante un cannello di vetro a cui si possono dare inclinazioni diverse, e da cui si può fare uscire l'acqua con velocità diversa, si può dimostrare che l'ampiezza della parabola dipende dalla direzione della spinta e dalla velocità.

§ 29. Misura dinamica delle forze.

1. Effetti delle forze. — Le forze si manifestano a noi mediante due sorta di effetti, cioè pressioni o trazioni, e movimenti. Si è già veduto (§ 16) come si misurino le pressioni o trazioni delle forze in chilogrammi, il che costituisce la misura statica.

Ora proponiamoci di studiare le relazioni che esistono tra le forze e i movimenti che esse producono nelle diverse masse, il che costituisce la *misura dinamica*.

Siccome le forze dette *istantanee*, come già si è osservato, (pag. 27) non sono propriamente tali, ma sono solo forze continue che agiscono per un tempo più o meno breve, perciò il caso più generale da considerarsi è quello delle forze continue.

E siccome le forze variabili si possono considerare come costanti per tempuscoli piccolissimi, e solo variabili da un tempuscolo all'altro, perciò considereremo solo il caso più semplice e più importante di forze continue costanti.

Le quantità da considerarsi sono tre, cioè le forze, le masse, e le accelerazioni, e per scoprire le relazioni che vi sono fra le medesime, il mezzo più semplice si è di supporre costante l'una ed esaminare la relazione che vi è fra le altre due.

2. Relazioni fra le forze e le accelerazioni a parità di massa. — Dapprima è evidente che due o più forze continue costanti si debbono ritenere eguali quando producono la stessa accelerazione sulla stessa massa.

Se poi le forze 1, 2, 3,
agiscono sulla stessa massa debbono produrre accelerazioni proporzionali ai numeri 1, 2, 3,

poichè le forze 2, 3, ecc., debbono evidentemente produrre sulla stessa massa, 2, 3, ecc., volte l'effetto della forza 1, cioè accelerazioni 2, 3, ecc., volte maggiori.

Dunque: *a parità di massa, le accelerazioni sono proporzionali alle forze.*

Quindi rappresentando

con F, F', due forze
a, a', le accelerazioni che esse

producono nella stessa massa, si ha la proporzione:

$$\frac{F}{F'} = \frac{a}{a'}.$$

3. Relazione fra le masse e le accelerazioni a parità di forza. — Se le stessa forza agisce sulle masse 1, 2, 3, ecc., produce accelerazioni proporzionali ai numeri $1, \frac{1}{2}, \frac{1}{3}$, ecc., perchè col crescere della quantità di materia e quindi della resistenza al moto deve diminuire nella stessa misura la velocità del moto stesso, cioè: *a parità di forza le accelerazioni sono in ragione inversa colle masse.*

Dunque rappresentando

con M, M', due masse
» a, a', le accelerazioni in esse prodotte

da una stessa forza, si ha la relazione:

$$\frac{M}{M'} = \frac{a'}{a}.$$

4. Relazione tra le forze e le masse perchè sia eguale l'accelerazione di queste. — Infine è evidente che per produrre la stessa accelerazione in una palla da schioppo e in una palla da cannone si richieggono forze proporzionali alle loro masse, col crescere delle quali cresce la resistenza al moto.

Ed in generale, per produrre la stessa accelerazione

nelle masse	1,	2,	3, . .
si richieggono forze proporzionate ai n^{i}	1,	2,	3,

cioè per la parità di accelerazione, *le forze debbono essere proporzionali alle masse.*

Dunque rappresentando

con: M, M′, 2 masse,
» F, F′, 2 forze

si ha la relazione:

$$\frac{F}{F'} = \frac{M}{M'}.$$

5. 2ª legge della meccanica. — La legge che: *quando più forze agiscono sulla stessa massa le accelerazioni sono proporzionali alle forze*, costituisce la 2ª *legge della meccanica* (la 1ª è quella dell'inerzia) dovuta a Galilei, e la quale si enuncia ordinariamente nei seguenti termini: *la variazione del moto è proporzionale alla forza che la produce ed avviene nella direzione di questa.*

Per *variazione del moto in una data direzione* si deve intendere *la variazione della velocità del mobile in quella direzione.*

6. Rapporto costante tra la forza e l'accelerazione per uno stesso corpo.

Se le forze 1, 2, 3,
quando agiscono sullo stesso corpo, producono
le accelerazioni 1, 2, 3.

consegue che rappresentando

con F, F′, F″, . . più forze,
» a, a', a'', . . le accelerazioni

che producono agendo sullo stesso corpo,

si ha: $\frac{F}{a} = \frac{F'}{a'} = \frac{F''}{a''} =$ numero costante.

cioè: *per uno stesso corpo il rapporto della forza all'accelerazione è costante.* Questo rapporto costante e caratteristico per ogni corpo, tra la forza che agisce sul medesimo e l'accelerazione che essa produce, si prende come misura della sua resistenza al

moto, cioè della sua quantità di materia, o massa, e perciò rappresentando questa con M, si ha l'eguaglianza:

$$\frac{F}{a} = M.$$

7. Quantità di moto prodotto dalle forze. — Dalla formola $\frac{F}{a} = M$, si ricava $F = M\,a$. Ora nel caso di uná forza continua costante, come si può considerare la gravità per piccole altezze di caduta, si ha $v = g\,t$ (pag. 70), e parimenti nel caso di una forza continua costante qualunque che produce l'accelerazione a, la velocità v che essa produce nel tempo t (pag. 80) è $v = a\,t$, d'onde si ricava $a = \frac{v}{t}$. Sostituendo questo valore nella formola $F = M\,a$ risulta

$$F = \frac{M\,v}{t}.$$

Per un'altra forza F', che agisce sulla M', per lo stesso tempo t, e le comunica la velocità v', si avrà parimenti:

$$F' = \frac{M'\,v'}{t}.$$

Quindi dividendo queste eguaglianze, membro a membro, risulta:

$$\frac{F}{F'} = \frac{M\,v}{M'\,v'}.$$

Ora il prodotto di una massa M per la sua velocità v si denomina in meccanica *quantità di moto* di quella massa, e la precedente eguaglianza esprime che: *il rapporto di grandezza fra le due forze è eguale al rapporto fra le quantità di moto che esse producono in egual tempo.*

8. Impulso di una forza. — Dalla formola $F = \frac{M\,v}{t}$ si ricava $F\,t = M\,v$. Ora il prodotto di una forza F per la durata t della sua azione chiamasi *impulso della forza*. Perciò *la quantità di moto acquistata da un corpo in un dato tempo è eguale all'impulso della forza che glie l'ha comunicata.*

9. Forza motrice. — Il prodotto M a di una massa per l'accelerazione in essa prodotta da una forza continua costante F (pag. 92) misura l'intensità di questa, che chiamasi *forza motrice.*

10. Misura di una forza variabile. — Se una forza è variabile la sua intensità varia da un istante all'altro ed è perciò d'uopo considerarla in un dato istante. Allora si prende come misura della intensità della forza in quel dato istante: la quantità di moto che essa produrrebbe nell'unità di tempo se durante questo agisse col valore che ha in quell'istante, come si misura la velocità di un istante del moto vario mediante lo spazio che il mobile percorrerebbe in 1 secondo se si movesse per questo tempo colla velocità di quell'istante (pag. 22).

11. Dimostrazione razionale del teorema del parallelogrammo delle forze. — Si è detto (pag. 85) che la diagonale di un parallelogrammo rappresenta la velocità o l'accelerazione risultante da due velocità od accelerazioni componenti rappresentate dai lati, e che le forze sono proporzionali alle accelerazioni od alle velocità che producono quando agiscono sulla stessa massa per egual tempo (pag. 89); dunque la diagonale di un parallelogrammo rappresenta anche la forza risultante da due altre rappresentate dai lati.

12. Relazione fra il peso di un corpo e la sua massa. — Vedemmo (pag. 92) che la massa di un corpo è misurata dal rapporto della forza che agisce sul medesimo all'accelerazione che quella produce in questo, siccome esprime la formola:

$$\frac{F}{a} = M.$$

Ora nel caso della gravità la forza che agisce su un corpo costituisce il suo peso P, e l'accelerazione si rappresenta colla lettera $g = 9{,}81$; quindi sostituendo tali lettere nella precedente eguaglianza, essa diviene:

$$\frac{P}{g} = M.$$

Dunque: *la massa di un corpo è misurata dal rapporto fra il suo peso* P *e l'accelerazione* g *che in esso produce la gravità in un dato luogo.*

Dalla stessa formola si ricava:

$$P = M\,g$$

la quale esprime che il peso assoluto di un corpo è una forza premente, o traente, la cui grandezza è direttamente proporzio-

nale alla sua massa M, e all'accelerazione g che la gravità comunica a questa.

Siccome il fattore g in un medesimo luogo è costante per tutti i corpi (pag. 71) la precedente formola esprime che il peso di un corpo in un dato luogo è proporzionale alla sua massa, il che giustifica la determinazione delle masse dei corpi mediante il confronto del loro peso (pag. 93).

§ 30. Il pendolo.

1. Definizione del pendolo. — Qualunque corpo soggetto alla sola azione del proprio peso e girevole attorno ad un asse orizzontale che non passi pel suo centro di gravità costituisce un apparechio semplicissimo ed importantissimo denominato *pendolo*. Esso ha ordinariamente la forma di una lente appesa ad un asse mediante una verga, affinchè fenda meglio l'aria, come si vede negli orologi a pendolo.

Nella sua forma più semplice può essere costituito da una pallina di piombo, o altro metallo, appesa ad un filo, come il filo a piombo.

2. Moto oscillatorio del pendolo. — Un pendolo sta in riposo, come ogni corpo sospeso, quando il suo centro di gravità giace sulla verticale che passa nel punto di sospensione (pag. 61), ma se lo si sposta e poi lo si abbandona esso si muove da una parte e dall'altra della posizione di riposo, e prende un moto che si dice *oscillatorio*. Ogni andata o ritorno del pendolo da un capo all'altro dell'arco che percorre chiamasi *oscillazione semplice;* ogni andata col rispettivo ritorno è un'*oscillazione completa;* il cammino percorso fra due posizioni estreme è l'*ampiezza dell'oscillazione;* il tempo impiegato in questa dicesi *durata*, o *periodo dell'oscillazione;* ed infine la frazione del tempo decorso dall'istante in cui il corpo oscillante è passato per la posizione di riposo chiamasi *fase* dell'oscillazione.

L'ampiezza delle oscillazioni del pendolo diminuisce a poco a poco, per causa della resistenza dell'aria e dell'attrito nell'asse di sospensione, senza le quali resistenze esso si solleverebbe sempre all'altezza da cui è caduto.

Ora quale è la forza che produce il moto oscillatorio del pendolo?

Una componente variabile del suo peso. Infatti nella posizione verticale (A P) (fig. 40) il peso (P g'') del pendolo è totalmente equilibrato dalla resistenza del filo e del punto fisso (A). Ma quando il pendolo viene spostato (in m), il suo peso ($m\,g$) non è più totalmente equilibrato dalla resistenza del filo, ma lo è solo più la componente ($m\,o$) che agisce nella direzione di tale lunghezza, mentre la componente ($m\,n$) che agisce in direzione perpendicolare lo fa discendere.

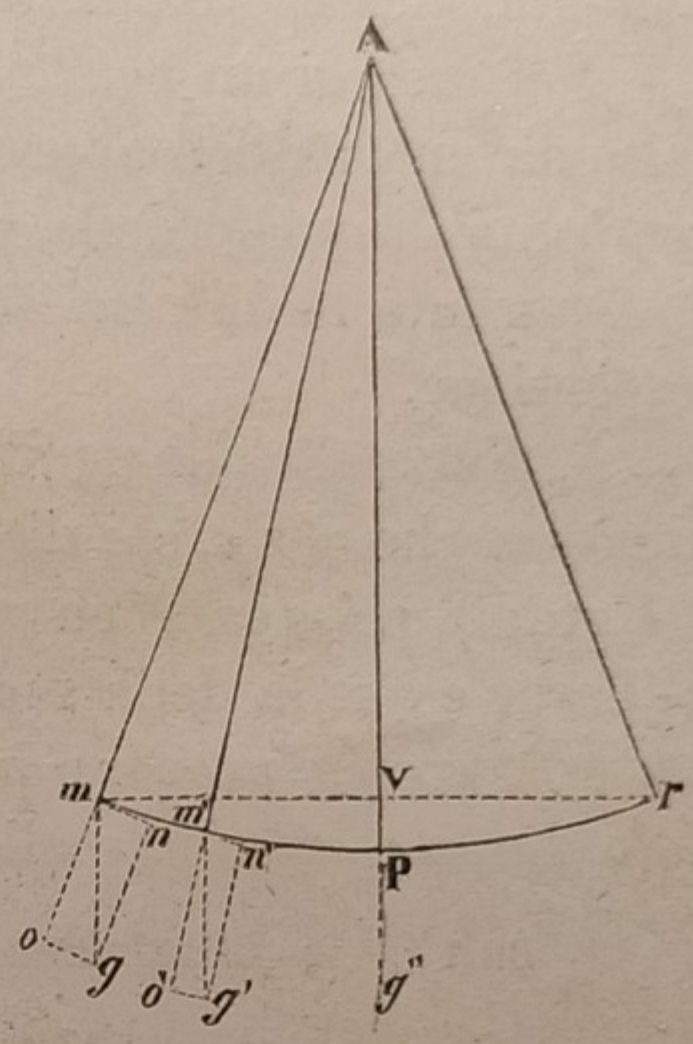


Fig. 40.

Se questa componente non equilibrata, che fa scendere il pendolo, fosse costante, il suo moto sarebbe uniformemente accelerato come quello dei corpi cadenti; ma siccome essa va diminuendo di grandezza (come si vede in $m'\,n'$) a misura che il pendolo si avvicina alla posizione verticale, nella quale detta componente è zero, perciò il moto del pendolo è bensì accelerato, ma non uniformemente, nella discesa. Per la stessa ragione tale moto è bensì ritardato, ma non uniformemente, nella ascesa.

3. Pendolo semplice e pendolo composto. — Per studiare le leggi del pendolo nella meccanica si distingue il *pendolo semplice* e il *pendolo composto*.

Il pendolo *semplice*, o *ideale*, o *matematico*, consiste in un punto geometrico che si suppone pesante, sospeso ad un punto fisso mediante un filo inestendibile e senza peso.

Il pendolo *composto*, o *reale*, o *fisico*, è quello che si realizza in pratica, costituito, o da una lente metallica appesa ad un asse mediante una verga, come negli orologi a pendolo, o da una pallina appesa ad un punto fisso mediante un filo. Quest'ultimo pendolo è quello che più s'avvicina al pendolo semplice.

Ogni pendolo composto si può evidentemente considerare come una riunione di tanti pendoli semplici quanti sono i punti pesanti

che si possono considerare nel medesimo, il che giustifica la denominazione di *pendolo composto*.

4. Lunghezza del pendolo. — La lunghezza di un pendolo semplice è la distanza fra il punto pesante e il punto di sospensione. E la lunghezza di un pendolo composto è quella di un pendolo semplice che oscilli nel medesimo tempo.

Nel caso di un pendolo approssimativamente semplice, costituito da una pallina appesa ad un filo, di peso trascurabile in confronto di quello della pallina, la lunghezza è assai approssimativamente la distanza fra il centro della pallina e il punto di sospensione.

5. Formola del pendolo. — Nella meccanica razionale si dimostra che per archi di oscillazione piccoli (non superiori a 3 o 4 gradi), pei quali non vi è differenza sensibile fra la lunghezza dell'arco e quella della sua corda, la *forza motrice* (*m n*, *m' n'*, fig. 40) *cresce proporzionatamente allo spostamento del pendolo dalla verticale*, e allora rappresentando

con l la lunghezza del pendolo,

» g l'accelerazione della gravità,

» t la durata delle oscillazioni,

» π il rapporto della circonferenza al diametro si ha l'eguaglianza.

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}. \qquad \ldots (1)$$

6. Legge relativa alla materia del pendolo. — La formola (1) contiene le seguenti 4 leggi delle oscillazioni di un pendolo.

1ª Legge. *In uno stesso luogo la durata delle oscillazioni di pendoli di egual lunghezza è indipendente dalla loro massa e quindi dalla materia del pendolo.*

Infatti questa non entra nella formola.

7. Prova sperimentale. — Le leggi delle oscillazioni del pendolo si possono illustrare sperimentalmente mediante il pendolo fisico precedentemente descritto, costituito da una pallina di metallo pesante appesa ad un filo di peso trascurabile in confronto di quello della pallina.

Per verificare la detta legge si fanno oscillare due o più pendoli di egual lunghezza, ma le cui palline constino di differenti sostanze; si vede così che tutti oscillano sensibilmente in egual tempo.

Però codesta legge si verifica esattamente solo nel vuoto, e solo approssimativamente nell'aria.

Ed è appunto dalla verificazione sperimentale di essa nel vuoto che si conclude col massimo rigore l'eguale velocità dei corpi liberamenti cadenti, e quindi la proporzionalità della gravità alle masse dei corpi (pag. 93).

8. Legge dell'isocronismo. — 2ª Legge. *Le piccole oscillazioni sono isocrone*, cioè si compiono in egual tempo, quantunque abbiano differente ampiezza, purchè questa non oltrepassi i 4 gradi.

Infatti l'ampiezza non entra nella formola.

Il che significa che uno stesso pendolo, o pendoli di egual lunghezza, impiegano lo stesso tempo a percorrere un arco di 1°, o di 2°, o di 3°.

Questa è la famosa legge dell'*isocronismo* del pendolo, scoperta dal Galilei riflettendo sulle oscillazioni di una lampada nel duomo di Pisa.

Il fondamento poi di essa sta nel fatto che, per archi piccoli, il pendolo cade con accelerazione approssimativamente proporzionale allo spostamento, perchè crescendo questo cresce la componente della gravità che lo fa discendere (pag. 95), cosicchè percorre l'arco più lungo in egual tempo.

Essa vale solo per archi piccoli, perchè per archi grandi più non sussiste l'accennata proporzionalità tra le ampiezze degli archi e le accelerazioni.

9. Prova sperimentale. — Si fanno oscillare due pendoli di egual lunghezza e possibilmente anche della stessa materia per evitare l'influenza dell'aria; essi per eguali archi di oscillazione impiegano egual tempo, e si veggono pure oscillare in egual tempo se i loro archi di oscillazione sono diseguali, purchè non troppo grandi.

Ovvero si numerano da prima le oscillazioni che un pendolo compie in un minuto primo, quando gli archi di oscillazione sono alquanto grandi, per es. di 3 gradi, e poi di nuovo quelle che

eseguisce nello stesso tempo, quando gli archi di oscillazione sono più piccoli, cioè di 1, o 2 gradi. Si trova così che malgrado la differenza di grandezza degli archi di oscillazione, i *numeri di oscillazioni eseguite in tempi eguali sono eguali.*

L'isocronismo delle piccole oscillazioni non è alterato dalla resistenza dell'aria; ma questa ne accresce la durata per la perdita di peso che essa produce nel pendolo, perdita la quale equivale a una diminuzione della forza che produce le oscillazioni.

10. Legge delle lunghezze. — 3ª Legge. *Le durate delle oscillazioni di pendoli di differenti lunghezze sono proporzionali alle radici quadrate delle lunghezze.*

Il che è espresso dalla formola.

Per es., per 2 pendoli le cui lunghezze sieno 1 e 4 le durate delle oscillazioni stanno come $\left(\sqrt{1}=1\right):\left(\sqrt{4}=2\right)$; cioè il pendolo di lunghezza 4 volte maggiore di un altro impiega un tempo 2 volte maggiore per fare un'oscillazione in uno stesso luogo.

11. Prova sperimentale. — Si mettono contemporaneamente in oscillazione due pendoli le cui lunghezze sieno, per es., 20 e $20 \times 4 = 80$ centimetri, e si vede che il più corto fa due oscillazioni, mentre il più lungo ne fa una, cioè che la durata delle oscillazioni del pendolo di lunghezza 4 è doppia di quella del pendolo di lunghezza 1.

Così pure un pendolo di lunghezza $20.9 = 180$ centimetri farebbe le sue oscillazioni in un tempo triplo, cioè farebbe 1 oscillazione mentre il pendolo di lunghezza 20 ne fa 3.

12. Legge relativa alla gravità. — 4ª Legge. *A parità di lunghezza, la durata delle oscillazioni è inversamente proporzionale alla radice quadrata dell'accelerazione della gravità.*

Il che è pure espresso dalla formola.

13. Prova sperimentale. — Questa legge è dimostrata dal fatto che uno stesso pendolo oscilla più celeremente verso i poli ove è maggiore la gravità, che non all'equatore ove, come vedremo, la gravità è minore.

Si può ancora illustrare la stessa legge sperimentalmente osservando che, se si fa oscillare un ago magnetico sul suo perno sotto la sola azione del magnetismo terrestre, esso oscilla più len-

tamente che sotto la doppia influenza del magnetismo terrestre e di un polo magnetico. Anzi, avvicinando questo all'ago, esso oscilla sempre più celeremente, perchè cresce l'intensità della forza che lo fa ritornare nella posizione primiera.

14. Pendolo composto. — La lunghezza di un pendolo semplice, come si è già notato (pag. 96), è semplicemente la distanza fra il punto pesante e il punto di sospensione.

Ma quale è la lunghezza di un pendolo composto? *È la lunghezza di un pendolo semplice che abbia la stessa durata di oscillazione.*

Infatti, ogni pendolo composto si può considerare come un aggregato di tanti pendoli semplici, quanti sono i punti materiali che lo compongono. Ora tali pendoli semplici, se non fossero riuniti fra loro in una sola massa, per la legge della lunghezza (pag. 98) oscillerebbero in tempi diversi, cioè quelli più lunghi oscillerebbero più lentamente del pendolo intiero, e quelli più corti più celeremente. Ma fra i punti più lontani, il cui moto viene accelerato, e quelli più vicini all'asse di sospensione il cui moto viene ritardato, è evidente che vi debbono essere punti i quali non sono nè accelerati nè ritardati, i quali perciò oscillano come se fossero liberi.

Quello di tali punti che giace sulla verticale condotta pel centro di gravità del pendolo composto chiamasi *centro di oscillazione*, mentre si chiama *centro di sospensione* il punto dell'asse che giace sulla stessa verticale, e la distanza del medesimo dall'asse di sospensione si denomina *lunghezza ridotta del pendolo composto*, ed è la lunghezza del pendolo semplice che ha la stessa durata di oscillazione.

Si può determinare abbastanza precisamente, e nel modo più semplice, la lunghezza ridotta di un pendolo composto, facendo oscillare assieme col medesimo un pendolo approssimativamente semplice, costituito da una pallina di platino, o di piombo, sospesa mediante un filo sottilissimo, di lunghezza tale che la pallina oscilli nello stesso tempo del pendolo composto. La lunghezza di tale pendolo approssimativamente semplice, la quale è assai approssimativamente eguale alla distanza fra il centro della pallina e il punto di sospensione (pag. 96), costituisce pure la lunghezza ridotta del pendolo composto.

15. Applicazione del pendolo alla misura del tempo. — Fra le numerose applicazioni del pendolo merita speciale menzione quella come regolatore del movimento degli orologi.

Quale è la forza che mette e mantiene in movimento gli orologi ?

Quanto alla forza che mette e mantiene in movimento gli orologi, in quelli a peso è la gravità, e in quelli a molla come gli oriuoli è la tensione della molla che viene avvolta attorno ad un asse quando si carica l'orologio. In ambi i casi la forza motrice agisce continuamente, e ogni forza continua tende ad aumentare la velocità del corpo su cui agisce, cioè a produrre un moto accelerato. Ora, il pendolo, mediante un congegno detto *scappamento*, lascia avanzare la ruota primaria solo di un dente ad ogni oscillazione, e siccome esso oscilla in tempi eguali così gli avanzamenti di quella ruota, e quindi anche delle altre che ricevono il movimento della medesima, avvengono in tempi eguali.

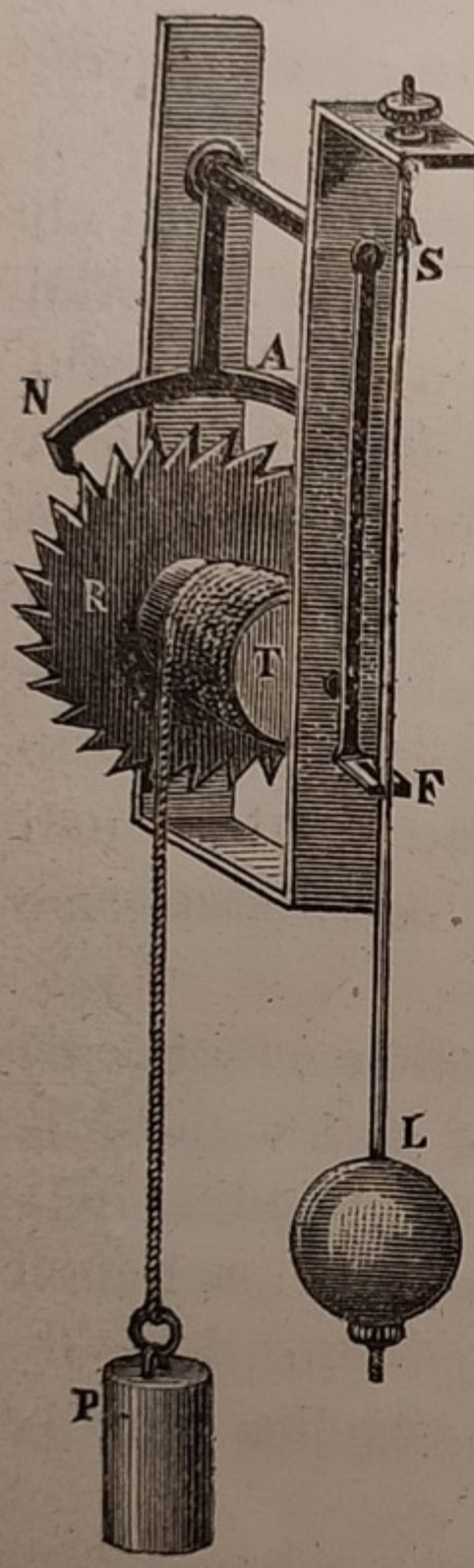


Fig. 41.

La fig. 41 rappresenta lo *scappamento ad àncora*. Questo consiste in un arco metallico (NA) munito ai due capi di due denti (dei quali nella figura si vede solo quello N a sinistra), sospeso mediante un gambo ad un asse che riceve un moto di oscillazione dal pendolo (SL) mediante una forchetta (F). Ad ogni oscillazione di quello, un dente dell'àncora si solleva e lascia girare la ruota dentata (R) di un solo dente, perchè l'altro dente dell'àncora entra tosto fra quelli della ruota e l'arresta. Nello stesso tempo i denti della ruota dànno una piccola spinta a quelli dell'àncora, per modo da mantenere questa, e quindi anche il pendolo, in oscillazione, se no esso si fermerebbe per gli attriti e la resistenza dell'aria.

16. Effetti del calore sul pendolo. — Infine la legge delle lunghezze insieme coll'altra che pel *calore i corpi si dilatano* e pel *freddo si restringono* spiega come d'inverno gli orologi ten-

dano a correre, e d'estate a ritardare, perchè nell'inverno il pendolo si accorcia, e perciò oscilla più in fretta, ed inversamente nella state. Perciò negli orologi più perfetti, detti *cronometri*, vi è un artifizio detto *compensazione*, mediante il quale si mantiene costante la durata delle oscillazioni. Negli orologi ordinari si ripara all'accennato difetto facendo variare la lunghezza della spirale che regola i movimenti del pendolo, cioè *si tocca il tempo*. E nelle pendole, mediante una vite sottostante alla lente, si solleva o si abbassa questa, secondochè il pendolo ritarda o accelera.

Però talvolta gli orologi d'inverno ritardano invece di correre, per l'inspessimento degli olii prodotto dal freddo.

17. Applicazione del pendolo alla determinazione della accelerazione g. e quindi alla misura della intensità della gravità terrestre.

Dalla formola $t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}}$ si ricava: $g = \frac{\pi^2 l}{t^2}$. Perciò se si determina la lunghezza l di un pendolo qualunque e il tempo t della durata delle sue oscillazioni, sostituendone i valori nella formola precedente, si può determinare g. Per esempio, il pendolo a secondi a Parigi essendo lungo $m.$ 0,9933, è:

$$g = \frac{(3,1416)^2 . 0,9933}{1} = 9^m,808.$$

A Torino, che trovasi alla latitudine di 45° circa, il valore di g è $g = 9,8052\ m.$ Alla stessa latitudine ed al livello del mare il valore della gravità sarebbe di $m.$ 9,8056. Tale differenza è dovuta all'altitudine di 245 $m.$ sul livello del mare a cui è posta Torino.

Se poi si fa oscillare un medesimo pendolo in luoghi diversi, si ha

per un dato luogo: $t = \pi \sqrt{(l : g)},$

e per un altro: $t' = \pi \sqrt{(l : g')},$

ossia: $\frac{t^2}{t'^2} = \frac{g'}{g};$

e siccome, rappresentando con n, n i numeri di oscillazioni di due pendoli che oscillano nei tempi t, t', si ha:

$$\frac{t}{t'} = \frac{n'}{n} \text{ (*), ossia } \frac{t^2}{t'^2} = \frac{n'^2}{n^2},$$

risulta:

$$\frac{g}{g'} = \frac{n^2}{n'^2}.$$

Cioè le accelerazioni di gravità nei due diversi luoghi stanno fra loro come i quadrati dei numeri delle oscillazioni di un medesimo pendolo. Mediante questo metodo si sono trovate le differenze della accelerazione di gravità nei diversi luoghi della superficie terrestre.

18. Pendolo a secondi. — Quando si conosce esattamente il valore di g in un determinato luogo si può facilmente determinare la lunghezza l che deve avere ivi il pendolo perchè segni i secondi. Infatti dalla formola:

$$t = \pi \sqrt{\frac{l}{g}},$$

si ricava:

$$l = \frac{gt^2}{\pi^2};$$

e ponendo $t = 1$ risulta

$$l = \frac{g}{\pi^2}.$$

Per es., se $g = 9{,}808$, si ottiene $l = \frac{9{,}808}{(3{,}1416)^2} = 0{,}993\ m.$

La lunghezza del pendolo a secondi è:

a	0° (equatore)	0,991	*metri*
a	45°	0,993	»
a	90° (poli) . .	0,996	»

cioè va crescendo dall'equatore ai poli, perchè cresce la gravità.

(*) Infatti, se un pendolo fa n oscillazioni in 1 minuto, chiamando t la durata dell'oscillazione, si ha $nt = 1$; e per un altro pendolo si ha $n't' = 1$; quindi $nt = n't'$ d'onde $n : n' = t' : t$.

19. Esperienza di Foucault (1851) per dimostrare col pendolo il moto di rotazione della terra. — Il pendolo può ancora somministrare una prova sperimentale diretta del moto di rotazione della terra.

Tale prova è fondata sul seguente principio: *Un pendolo oscilla sempre nello stesso piano, quantunque venga fatto girare il suo punto di sospensione, purchè nessuna forza agisca sul medesimo fuori di quel piano*

Si può dimostrare sperimentalmente cotesta conseguenza della legge d'inerzia mediante un apparecchio costituito da un pendolo appeso ad un arco impiantato stabilmente in un disco inferiore orizzontale, che si può fare girare attorno al suo perno. Si mette il pendolo in oscillazione secondo una direzione determinata qualunque, poi si fa girare il disco orizzontale inferiore; si vede così, che il pendolo oscilla sempre nella direzione primitiva, purchè l'apparecchio sia ben centrato e la sospensione del pendolo sia perfettamente libera da ogni parte.

Ciò posto, se noi facessimo tale esperienza al polo nord, il globo terrestre girando sotto il pendolo da ovest ad est, i suoi meridiani avrebbero un moto reale di rotazione da ovest ad est rispetto al piano immobile di oscillazione del pendolo. E pel principio che quando uno è in moto in una direzione i corpi che non si muovono con lui gli paiono muoversi in senso contrario, l'osservatore vedrebbe nel piano d'oscillazione del pendolo un moto apparente in senso contrario, cioè da est ad ovest. Tale moto di rotazione al polo sarebbe precisamente di 360° in 24 ore.

Se si facesse l'esperienza all'equatore, cioè un pendolo fosse sospeso ad un punto collocato su una verticale passante pel piano dell'equatore, non avverrebbe alcuna deviazione del piano, perchè ivi la terra non ha alcuna rotazione rispetto a quella verticale.

Nelle latitudini intermedie fra l'equatore e i poli la rotazione del piano di oscillazione del pendolo rispetto ai meridiani è compresa fra quei due valori 0° e 360°; per es. a 45° è di 254° circa in 24 ore, ossia di $\frac{254}{24} = 10°$ circa in 1 ora.

L'esperienza si fa con pendoli più lunghi possibile, appesi per es., alle cupole delle chiese (*).

§ 31. Azione e reazione.

1. Caso della quiete. — Se si mette un peso su di una molla a spirale questa si accorcia fino al punto in cui esercita contro il peso una azione uguale e contraria che gli fa equilibrio; così pure tutti i corpi che posano su di un tavola, o sul pavimento di una camera, esercitano col loro peso una pressione la quale è equilibrata da una pressione uguale e contraria che la tavola od il pavimento esercitano contro i medesimi; quando una persona tira una fune attaccata ad un punto fisso questo esercita una trazione uguale e contraria che fa equilibrio alla prima, infatti se la fune si strappa si arrischia di cadere a terra perchè l'azione traente non è più equilibrata da una azione uguale e contraria che cessa ad un tratto.

Dunque quando un corpo esercita un'azione su di un altro, prova per parte di questo una azione uguale e contraria detta reazione, il che si esprime dicendo *che ogni azione è sempre accompagnata da una reazione eguale e contraria.*

2. Caso del moto. — Lo stesso fatto si verifica nel caso del moto. Così, sparando un fucile, il proiettile acquista una certa velocità nella direzione del tiro, e se il fucile fosse libero indietreggerebbe con tale velocità che, moltiplicata per la sua massa, darebbe una quantità di moto (pag. 92) uguale a quella del pro-

---

(*) Nell'eseguire tale esperienza si osserva che le oscillazioni del pendolo divengono coniche, cioè che il suo centro di oscillazione invece di descrivere archi di circolo descrive elissi più o meno allungate. Tuttavia si scorge che l'asse maggiore di tali elissi devia nel senso indicato.

Tali irregolarità nel movimento di oscillazione del pendolo dipendono principalmente da due cause: la prima è che il punto di sospensione del pendolo può non essere perfettamente fisso, ma descrivere una piccola curva; la seconda si è che la palla può non essere omogenea, per modochè il suo centro di gravità non coincida perfettamente col centro di figura. Il più sovente la verticale del centro di gravità non coincide con quella passante per il punto di sospensione e per il punto di attacco del filo alla palla. Queste due cause possono produrre una piccola coppia laterale che fa variare il piano d'oscillazione. Ora è impossibile evitare perfettamente l'azione delle medesime.

iettile; se poi l'arma fosse fissata al suolo allora anche la terra reagirebbe, ma siccome la sua massa è estremamente grande rispetto a quella del proiettile la sua velocità riescirebbe insignificante.

§ 32. La forza centrifuga.

1. Condizione del moto curvilineo. — Siccome ogni corpo per inerzia (pag. 24) tende a muoversi in linea retta, ne consegue che per fare descrivere ad un corpo una curva deve su di esso agire una forza la quale lo faccia ad ogni istante deviare dalla linea retta secondo cui tende a muoversi. Così, per fare girare una pietra colla fionda, la mano deve ad ogni istante farla deviare dalla direzione rettilinea, secondo cui essa tende a muoversi. Parimenti i pianeti descrivono orbite elittiche attorno al sole, perchè l'attrazione di questo li fa ad ogni istante deviare dalla direzione rettilinea secondo cui tendono a muoversi.

Per questa reciproca attrazione le masse celesti minori girano regolarmente attorno alle maggiori più vicine, e se essa cessasse ciascuna massa si muoverebbe in linea retta per inerzia.

2. Forza centripeta e centrifuga. — Nel movimento curvilineo si distinguono la forza *centripeta* e la *centrifuga*.

Chiamasi *centripeta: la forza che devia continuamente verso il centro della curva il corpo che tende per inerzia a progredire nella direzione rettilinea della tangente alla medesima.*

Per la luna la forza centripeta è la gravitazione terrestre, per la terra e gli altri pianeti è la gravitazione solare; per la pietra girante nella fionda la forza centripeta è la resistenza della fune e della mano; per un convoglio che si muove su di una curva di via ferrata è la resistenza delle rotaie curvilinee; nella rotazione di un corpo attorno ad un asse fisso la forza centripeta è costituita dalla coesione e dalla resistenza dei punti fissi.

Chiamasi invece *forza centrifuga: la forza colla quale il corpo tende continuamente ad allontanarsi dalla curva, perchè per inerzia tende a progredire in linea retta.*

Codesta tendenza si osserva chiaramente nella pietra girante

nella fionda, la quale tira la mano che la trattiene, e quando si lascia andare l'un capo della fionda parte nella direzione della tangente alla circonferenza fino allora descritta. Le vetture che svolgono celeremente l'angolo d'una strada sono nel pericolo di rovesciare verso l'esterno; i treni che percorrono tratti ricurvi di ferrovia minacciano di uscir fuori dalle rotaie, al che si ripara ponendo la rotaia interna più bassa dell'esterna, e così opponendo una componente del peso alla forza centrifuga. Ove è maggiore la curvatura, maggiore inclinazione si dà alle rotaie verso il centro della curva, per fare equilibrio alla maggiore forza centrifuga.

Così pure il cavallo e il cavaliere nel circo si inclinano entrambi verso il centro, tanto più quanto più rapido è il loro moto, per fare equilibrio alla forza centrifuga.

L'acqua contenuta nel secchio non cade quando è capovolto in alto, se esso gira abbastanza rapidamente, sì che la forza centrifuga sia maggiore della gravità.

3. Moto circolare uniforme. — La forza centrifuga nasce in ogni corpo che percorre una curva. Ora le curve possono avere infinite forme, la più semplice delle quali è la circonferenza; ma qualunque altra curva si può, per un arco sufficientemente piccolo, considerare come circolare, perchè si può sempre descrivere una circonferenza che coincida colla curva per il detto arco sufficientemente piccolo.

Di più il corpo che percorre una curva può avere un moto uniforme o vario. Ma qualunque moto vario si può per un tempo brevissimo considerare come uniforme.

Quindi il problema di determinare la forza centrifuga che si sviluppa in un corpo che percorre una curva qualunque, con moto qualunque, si riduce a quello più semplice di determinare la forza centrifuga che si sviluppa in un corpo che percorre una circonferenza con moto uniforme.

4. Leggi della forza centrifuga nel moto circolare uniforme. -- Ora si dimostra nella meccanica, che *nel moto circolare uniforme la forza centrifuga è in ragione diretta della massa e del quadrato della velocità, ed in ragione inversa del raggio della circonferenza.*

5. Formole della forza centrifuga. — Rappresentando con m la massa del corpo,

» v la sua velocità,

» r il raggio della circonferenza che esso percorre,

» f la forza centrifuga,

l'espressione algebrica di questa è data dalla formola:

$$f = m\frac{v^2}{r}. \qquad \ldots\ldots (1)$$

Si dà anche un'altra forma alla espressione della forza centrifuga, osservando che, se il corpo descrive la circonferenza con moto uniforme, allora si ha (pag. 23): $v = \frac{s}{t} = \frac{2\pi r}{t}$, essendo $s = 2\pi r$ la lunghezza della circonferenza di raggio r, e t il tempo che esso impiega a percorrerla, il quale dicesi *tempo periodico*. Elevando al quadrato ambi i membri, si ha $v^2 = \frac{4\pi^2 r^2}{t^2}$, e sostituendo questo valore di v^2 nella formola $f = \frac{m}{r}v^2$, si ottiene:

$$f = \frac{m}{r}\frac{4\pi^2 r^2}{t^2} = \frac{4\pi^2 rm}{t^2} \qquad \ldots (2)$$

dalla quale si scorge che se per la 1ª formola, *la forza centrifuga è proporzionale inversamente al raggio, a parità di velocità*, è invece *direttamente proporzionale al raggio, a parità di tempo periodico*, per la 2ª formola.

6. Prove sperimentali. — *a*) *Colla fionda.* — Se con una fionda di lunghezza costante si fanno girare con velocità costante delle pietre di diversa massa, la mano sente che col crescere del peso delle pietre cresce la trazione che essa deve esercitare sulle medesime per fare equilibrio alla crescente forza centrifuga.

Se poi colla stessa fionda si fa girare una stessa pietra con velocità diversa, si sente che col crescere della velocità cresce rapidamente la trazione che la pietra esercita sulla mano, e quella contraria che questa deve esercitare sulla pietra.

Infine, se si fa variare la lunghezza della fionda, restando costante la pietra e la velocità, si sente che col crescere della

lunghezza della fionda, diminuisce la trazione che la mano deve esercitare sulla pietra. Infatti una linea retta si può considerare come una circonferenza di raggio infinito, ed in un corpo che percorre una linea retta la forza centrifuga è nulla. Quindi se una fionda fosse infinitamente lunga, la forza centrifuga della pietra sarebbe nulla.

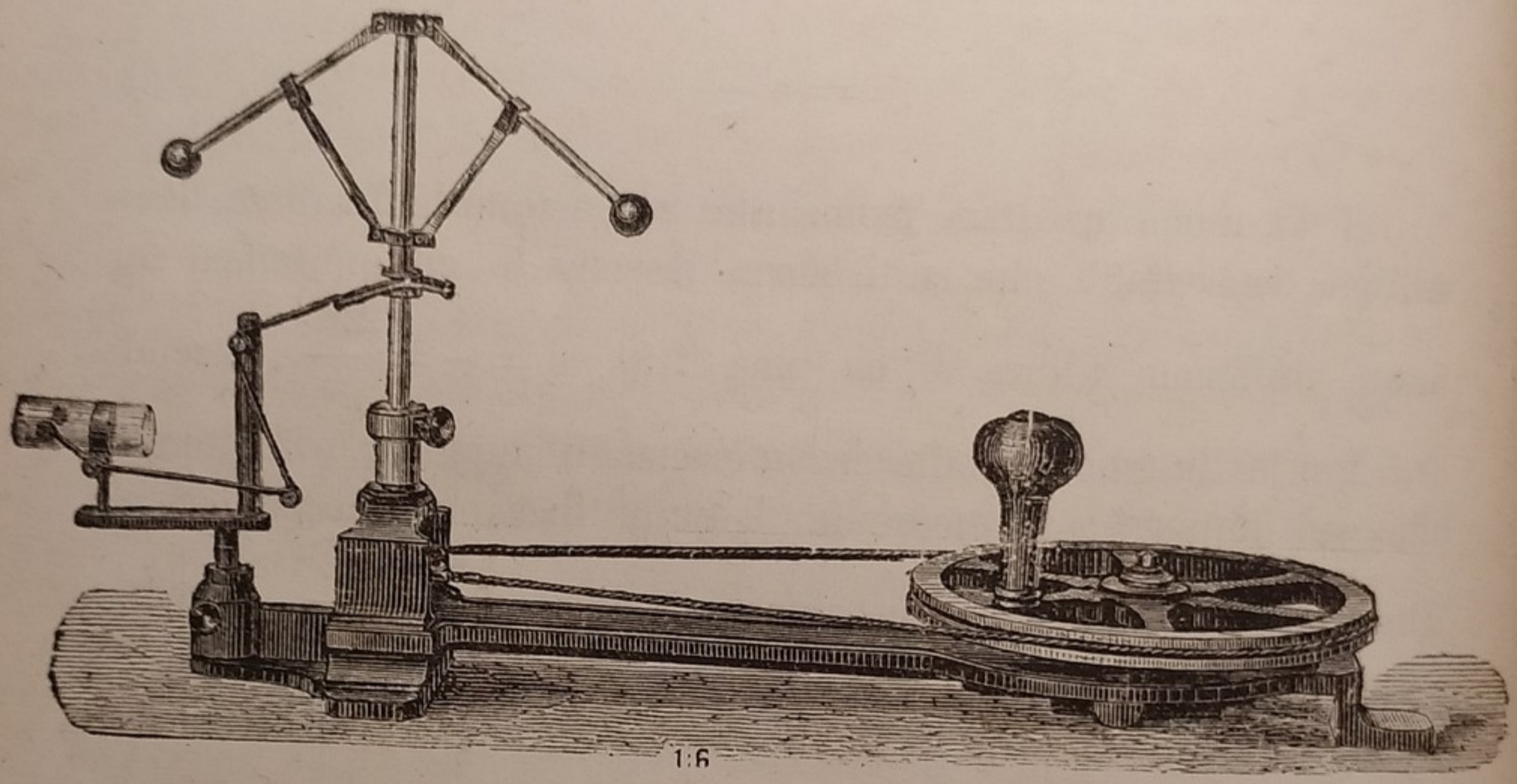


Fig. 42.

b) *Coll' apparecchio della forza centrifuga.* — Nelle scuole si dimostrano sperimentalmente le leggi della forza centrifuga con un apparecchio che prende il nome da tale forza, e consiste in una carrucola che si fa girare a mano con un manubrio (fig. 42), e la quale mediante una fune comunica un moto di rotazione più celere ad un'altra carrucola minore applicata ad un asse, a cui si possono fissare a vite diversi apparecchi.

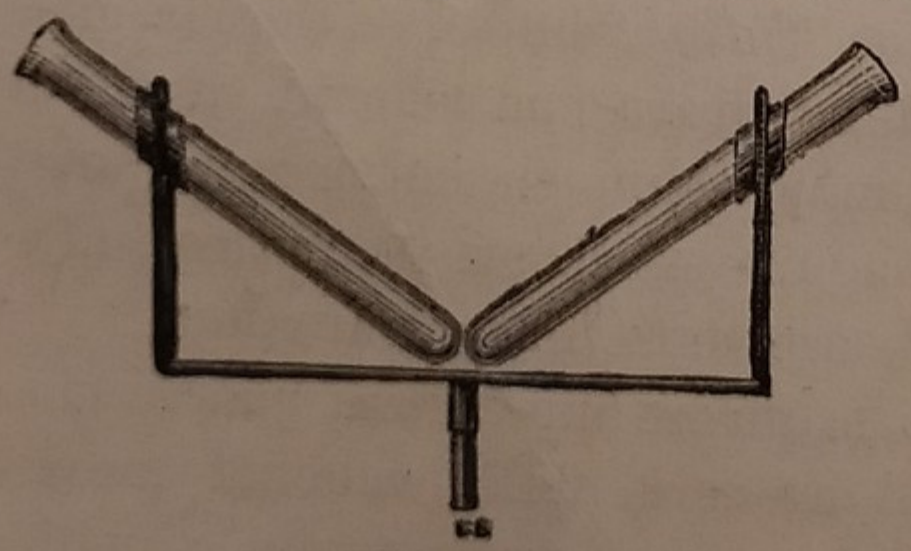


Fig. 43.

Per dimostrare l'influenza della massa si avvita sull'asse un sostegno di legno portante due tubi in posizione radiale ed inclinati (fig. 43), nell'uno dei quali vi è: acqua e una palla di piombo, e nell'altro: acqua e una palla di sughero, o di midollo di sambuco, o di legno più

leggiero dell'acqua. Indi si tappano i tubi affinchè gli oggetti dentro collocati non ne escano.

Mentre nel riposo il sughero sta sopra l'acqua, e questa sopra il piombo, nella rotazione avviene il contrario, cioè il piombo si porta nella parte più elevata del tubo e quindi sopra l'acqua, perchè acquista maggior forza centrifuga, e perciò si porta più lontano dall'asse di rotazione. Inversamente accade per il sughero e l'acqua.

Se poi si fissa all'asse di rotazione un sostegno portante una verga metallica orizzontale (fig. 44) in cui sono infilzate due palle di avorio collegate da un filo, le cui masse sono 1 e 2, si vede che, collocandole in modo che i loro centri siano egualmente distanti dall'asse, nella rotazione la palla di massa maggiore trascina tosto quella di minor massa, perchè acquista maggior forza centrifuga. Ma è possibile collocare le due palle coi loro centri a distanze tali dall'asse, che le loro forze centrifughe si facciano equilibrio, qualunque sia la velocità di rotazione, e ciò si verifica, per es., quando

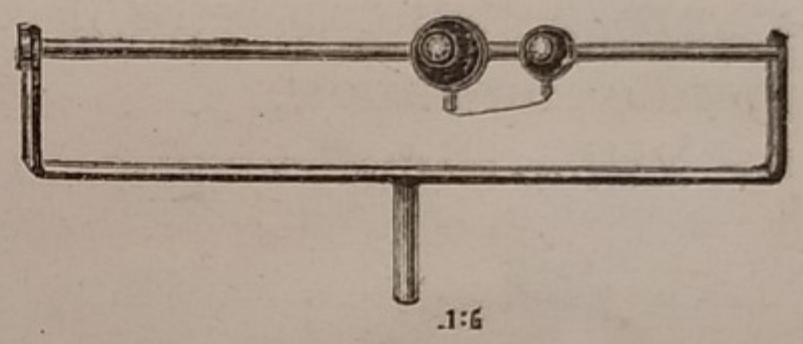


Fig. 44.

le masse essendo	1	e	2
le distanze dei loro centri sono	2	e	1.

7. Applicazioni della forza centrifuga. — Numerose sono le *applicazioni della forza centrifuga* nell'industria, nelle arti e nella scienza.

Nelle macchine a vapore si usa il *regolatore a forza centrifuga* (fig. 42).

Per mezzo della forza centrifuga si asciugano in 10, o 15 minuti, le biancherie e le stoffe così bene, che basta poi distenderle per un quarto d'ora all'aria per averle perfettamente asciutte. A tal uopo esse vengono collocate in un tamburo a pareti metalliche bucherellate, a cui una forza motrice comunica un rapido moto di rotazione, pel quale l'acqua aderente ai tessuti viene distaccata dalla forza centrifuga, come quando si asciuga l'insalata.

Nelle fabbriche di zucchero, mediante la forza centrifuga, si separano le melasse liquide dai pezzi di zucchero solido, e così in 5 minuti si compie una separazione che una volta richiedeva da 18 a 45 giorni. Si usa pure oggidì lo *smelatore* a forza centrifuga, col quale si fa uscire il miele liquido dai favi.

Il ventilatore a forza centrifuga di Desaguliers è un tamburo, nel cui interno vi è un molinello. Comunicando a questo un rapido moto di rotazione, l'aria compresa fra le alette viene proiettata dalla forza centrifuga verso la superficie interna del tamburo, d'onde esce poi per un canale, mentre nuova aria accorre dall'esterno verso il centro del molinello, ove si forma un vuoto o rarefazione.

Nella scienza si spiega lo schiacciamento della terra ai poli (21000 metri circa di differenza fra il raggio equatoriale e il raggio polare) mediante la forza centrifuga che nasce dal moto di rotazione della terra sul suo asse, e il suo passato stato di fluidità.

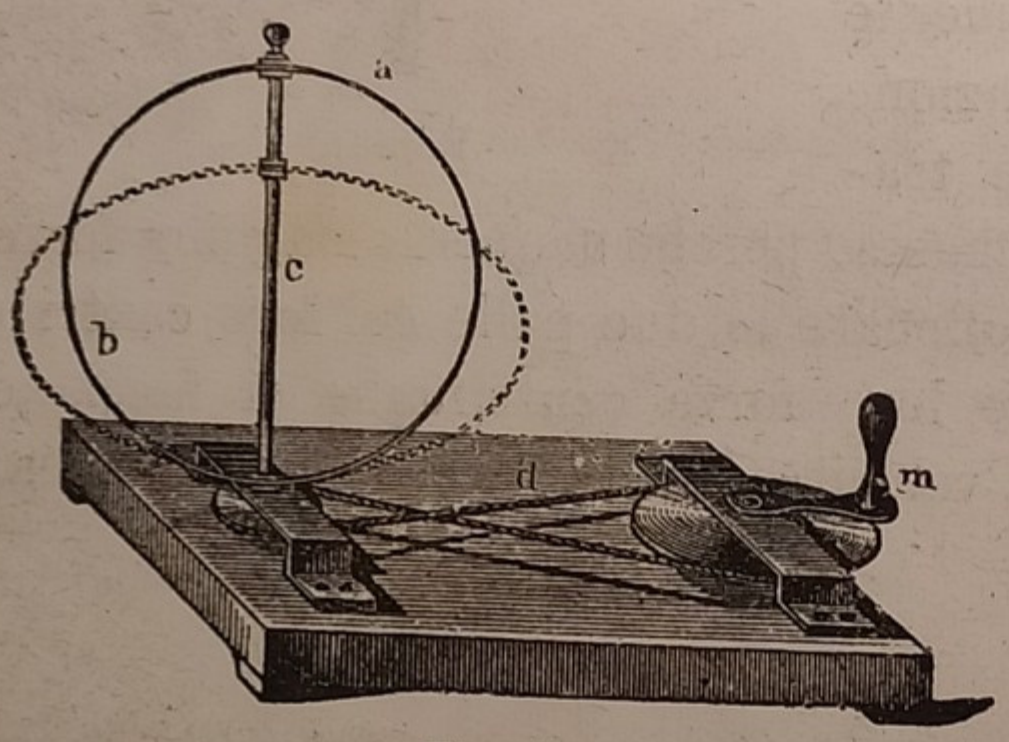


Fig. 45.

Ad illustrare sperimentalmente tale origine dello schiacciamento terrestre si fa l'esperienza degli anelli (fig. 45), mediante la macchina della forza centrifuga. All'asse verticale di questa si fissa un sostegno portante due anelli di pieghevole lamina di acciaio, i quali, fatti girare, si schiacciano tanto più quanto maggiore è la velocità della rotazione, perchè si sviluppa forza centrifuga tanto maggiore quanto più le molecole sono lontane dall'asse e quanto maggiore è la velocità della rotazione.

8. Cause della variazione della accelerazione di gravità dall'equatore ai poli. — Si è già notato (pag. 98) che la gravità è massima ai poli e minima all'equatore. Ciò avviene per 3 cause.

1° Perchè la terra è schiacciata ai poli e rigonfia all'equatore (pag. 110), permodochè un corpo è ai poli 21000 metri più vicino al centro della terra che non all'equatore, e la gra-

vità cresce nella misura con cui diminuiscono i quadrati delle distanze dei corpi dal centro della terra, finchè essi sono al di fuori di questa.

2° Perchè la forza centrifuga dovuta al moto rotatorio terrestre è massima all'equatore ove la velocità di rotazione è massima e nulla ai poli ove la velocità di rotazione è nulla. Quindi all'equatore la gravità viene diminuita dalla forza centrifuga maggiore più che verso i poli ove quella forza è minore.

Siccome poi anche lo schiacciamento della terra verso i poli è dovuto alla rotazione, ne viene che, sia direttamente che indirettamente, le cause delle variazioni della gravità devono ascriversi al moto rotatorio terrestre.

3° Perchè all'equatore (E fig. 46) la forza centrifuga che è massima è ancora direttamente contraria alla gravità, perciò diminuisce questa con tutto il suo valore; mentre a misura che si va verso i poli la forza centrifuga, che ha la direzione (*mc*) perpendicolare all'asse terrestre, fa angolo sempre maggiore colla direzione della gravità, che è quella (*n* 0) del raggio terrestre; quindi, mentre essa è già minore, per la minore velocità di rotazione, diminuisce ancora la gravità non con tutto il suo valore, come avviene all'equatore, ma solo con quella componente che ha la direzione del raggio terrestre, mentre la componente perpendicolare a questo non la altera.

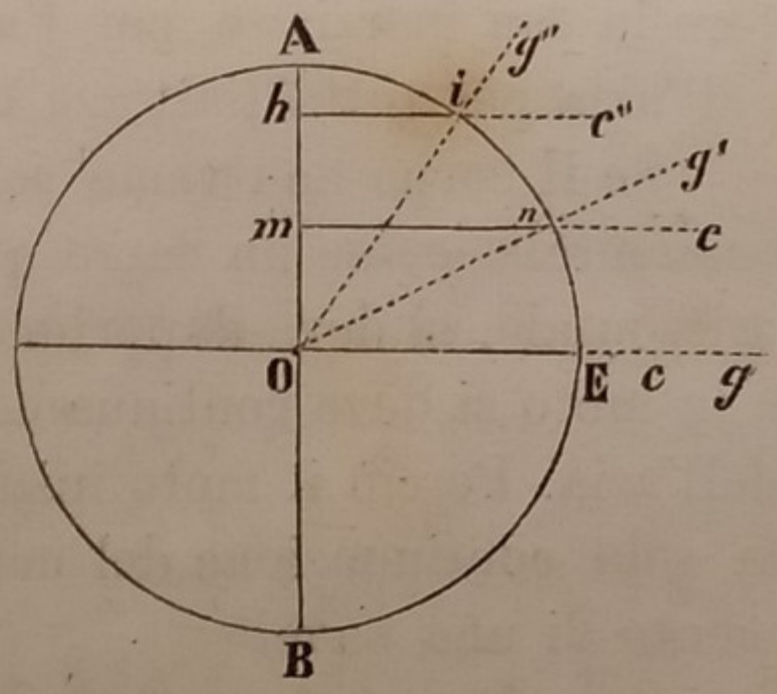


Fig. 46.

Infine, se si considera che la forza centrifuga all'equatore è $^1/_{289}$ della gravità, che 289 è il quadrato di 17, e che la forza centrifuga cresce col quadrato della velocità (pag. 106) consegue che, se il moto di rotazione della terra divenisse 17 volte più rapido, la forza centrifuga all'equatore diverrebbe $17^2 = 289$ volte più grande, epperciò uguale alla gravità, e i corpi cesserebbero ivi di essere pesanti. Se poi il moto di rotazione della terra divenisse ancora più rapido, i corpi verrebbero lanciati nello spazio dalla forza centrifuga.

§ 33. Il lavoro meccanico.

1. Idea del lavoro meccanico. — Tutti i cangiamenti che l'uomo fa subire alla materia per adattarla ai suoi bisogni richieggono il movimento della medesima.

Ora, ogni movimento della materia presenta una resistenza, dapprima per l'inerzia della medesima, e poi per vincere le diverse forze naturali che agiscono su di essa, siccome la gravità, la coesione, l'adesione, l'affinità chimica, ed infine per la presenza di altri corpi a cui non si può a meno di partecipare una parte di quel moto che si comunica alla materia.

Così se un corpo deve essere sollevato si deve dapprima vincere la sua inerzia e poi l'azione della gravità e la resistenza dell'aria per tutta l'altezza del sollevamento.

Se il corpo non viene sollevato ma solo mosso su un piano orizzontale, come un carro quando viene trascinato su una strada orizzontale, si deve dapprima vincere la sua inerzia, e poi quando è in moto si deve continuamente vincere l'attrito e la resistenza dell'aria. Perciò il moto iniziale del carro è più faticoso che non la sola continuazione del medesimo. Lo stesso dicasi pel movimento di una nave.

Quando poi si vuole cangiar la forma dei corpi, come nel segarli, piallarli, forarli, frantumarli, dilatarli, fonderli, si deve vincere la coesione.

Perciò lo studio delle forze naturali e delle loro applicazioni scientifiche ed industriali ha condotto all'idea del *lavoro meccanico*, che consiste nel *vincere resistenza lungo un certo spazio*.

E la grandezza di un lavoro è manifestamente proporzionale alla grandezza della resistenza che si vince e alla lunghezza dello spazio lungo il quale viene superata la resistenza. Così la grandezza del lavoro di un facchino che porta legna in alto è manifestamente proporzionale al numero dei chilogrammi di legna e alla altezza a cui li porta; perciò si paga appunto il lavoro in proporzione di quei due fattori, cioè resistenza e spazio.

La grandezza di un lavoro è nulla quando è nullo l'uno o

l'altro dei suoi due fattori, cioè lo spazio o la resistenza. Così un cavallo che tiri un carro senza farlo muovere, fa uno sforzo, ma non un lavoro.

Sarebbe pure nullo il lavoro di un animale che trascina un carro con velocità costante se non avesse continuamente da vincere l'attrito e la resistenza dell'aria, perchè quando il carro è in moto continua a muoversi da sè per inerzia.

La grandezza di un lavoro è poi indipendente dal tempo in cui lo si eseguisce. Infatti, è evidente che il lavoro di portare 100 miriagrammi di legna dal cortile al 4° piano di una casa è sempre lo stesso qualunque sia il numero delle ore in cui lo si eseguisce.

2. Chilogrammetro. — Siccome ci serviamo di una linea per la misura delle linee, di un volume per la misura dei volumi, di un peso per la misura dei pesi, così deve un lavoro essere misurato mediante un altro lavoro.

Si è preso come unità di lavoro: quello che si fa vincendo la resistenza di 1 *kg.* per lo spazio di un metro nel vuoto; tale unità venne denominata *chilogrammetro*, e s'indica colle lettere *kgm*.

Così viene eseguito un chilogrammetro di lavoro, sia sollevando un chilogramma all'altezza verticale di 1 *m.* sia esercitando una trazione orizzontale di 1 *kg.* per lo spazio di 1 *m.*

3. Diversi casi da distinguersi nella misura del lavoro. — Nella misura del lavoro si debbono distinguere diversi casi, secondochè la resistenza è costante o no, e secondochè la direzione della forza che lo produce, o della resistenza che ne è la causa, coincide con quella del movimento, o no.

4. Misura del lavoro quando la resistenza è costante e la direzione della forza coincide con quella del moto. — Consideriamo dapprima il caso più semplice, cioè di una resistenza costante, la quale agisce nella direzione del movimento, come quando si solleva un peso verticalmente, fatta astrazione dalla diminuzione della intensità della gravità coll'altezza. In tal caso la *grandezza del lavoro è manifestamente data dal prodotto della resistenza che si vince, o della forza che produce questo effetto, per la grandezza dello spazio lungo il quale essa agisce.*

In generale rappresentando

con F la forza,
» s lo spazio,
» E il lavoro,

si ha l'eguaglianza:

$$E = F\,s.$$

Ovvero, rappresentando con R la resistenza che si vince, si scrive:

$$E = R\,s.$$

Per es., si misura il lavoro di una locomotiva moltiplicando lo spazio percorso per il numero dei chilogrammi di pressione o trazione che essa deve esercitare sul treno per mantenerlo in movimento, il che si può ottenere frapponendo un dinamometro fra la locomotiva e il treno.

5. Misura del lavoro quando la resistenza è costante, ma la direzione del moto non coincide con quella della forza. — Nella misura del lavoro può avvenire che il punto di applicazione della forza non possa muoversi nella direzione di essa, ma solo in una direzione differente. Per esempio suppongasi che il punto C (fig. 47) di applicazione della forza premente C f non possa muoversi nella direzione della medesima, ma sia costretto a rimanere sulla linea o superficie AB, sulla quale la forza gli fa percorrere lo spazio CD.

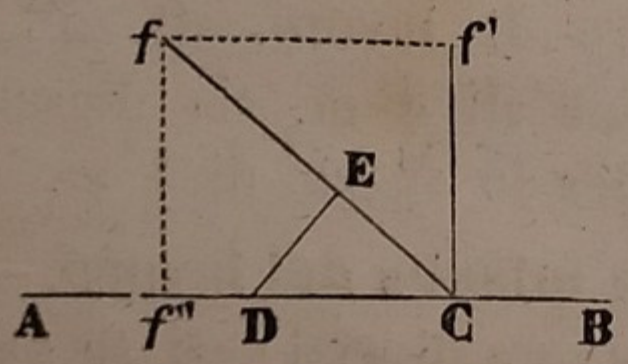


Fig. 47.

Allora si deve osservare che la forza obliqua C f produce lo stesso effetto delle sue due componenti: Cf' perpendicolare alla superficie AB, e Cf'' parallela alla medesima.

Ora la componente perpendicolare Cf' non produce lavoro, perchè supposto il corpo rigido, lo spazio percorso nella sua direzione è nullo (pag. 113), e solo produce lavoro la componente Cf'', la quale è rappresentata dalla proiezione della forza C f sulla direzione del moto. Quindi il lavoro della forza Cf'' è C$f'' \times$ CD.

Ma questo lavoro può anche essere espresso dal prodotto della

forza stessa Cf per la proiezione C E dello spazio C D sulla sua direzione. Infatti i triangoli simili Cff'', C DE danno la proporzione:

$$\frac{Cf''}{Cf} = \frac{CE}{CD},$$

d'onde si ricava:

$$Cf'' \times CD = Cf \times CE.$$

Quindi risulta il seguente teorema: *quando la direzione del moto del punto di applicazione di una forza non coincide colla direzione di essa, il suo lavoro è dato; o dal prodotto dello spazio per la proiezione della forza sulla direzione di questo, o dal prodotto della forza stessa per la proiezione dello spazio sulla direzione della medesima.*

6. Valutazione del lavoro nel caso di forze variabili in intensità e direzione. — Se la grandezza, o la direzione della resistenza, od ambedue assieme sono variabili, per valutare il lavoro prodotto nel movimento lo si considera come costituito da una successione di movimenti abbastanza brevi perchè in ciascuno di essi si possa ritenere costante la resistenza e la direzione, e si sommano i lavori elementari corrispondenti a questi movimenti, calcolati colla regola esposta.

7. Lavoro motore e lavoro resistente. — Quando una forza applicata ad un corpo deve continuamente vincere una resistenza per mantenerlo in moto si distingue il *lavoro motore* e il *lavoro resistente.*

Per es., nel caso di un animale che trascina un carro, esso deve continuamente sviluppare un lavoro motore per vincere il lavoro resistente, causato dall'attrito e dalla resistenza dell'aria.

Il lavoro motore è misurato dal prodotto della forza motrice, o potenza F, per lo spazio s percorso dal suo punto di applicazione nella sua direzione, cioè è Fs; e il lavoro resistente è misurato dal prodotto della resistenza R che viene vinta per lo spazio s' percorso nella direzione della medesima, cioè è Rs'.

Nel caso del moto uniforme il lavoro motore è continuamente eguale al lavoro resistente.

Per esempio un convoglio, od una nave, o le macchine di un'officina si muovono con moto uniforme, quando il lavoro pro-

dotto in ogni istante dalla forza motrice è precisamente eguale a quello consumato dalle resistenze.

Se il lavoro motore supera quello consumato, o resistente, il moto si accelera, il che avviene sul principio del medesimo; se il lavoro consumato o resistente supera quello motore, la velocità diminuisce; il che avviene alla fine del moto.

8. Motore. — Il sistema che eseguisce lavoro chiamasi *motore*; così è un motore una macchina idraulica, una macchina a vapore, un animale, ecc., ecc.

9. Potenza di un motore. — Mentre nella valutazione del lavoro non si deve tener conto del tempo impiegato ad eseguirlo, perchè, come si disse (pag. 113), un lavoro ha sempre la stessa grandezza, qualunque sia il tempo in cui viene eseguito, invece nella valutazione delle forze, mediante il lavoro di cui sono capaci, si deve tenere conto non solo della grandezza del lavoro che eseguiscono, ma anche del tempo impiegato ad eseguirlo, perchè manifestamente una forza ha tanto maggior valore quanto maggior lavoro eseguisce in un dato tempo, o quanto minor tempo impiega ad eseguire un dato lavoro.

Così un bracciante di forza doppia di un altro farà lo stesso lavoro in un tempo metà, ovvero un lavoro doppio nello stesso tempo; cioè la grandezza di una forza è proporzionale alla grandezza del lavoro che essa può eseguire nell'unità di tempo.

Il lavoro eseguito da un motore in 1 secondo si dice *potenza del motore*.

10. Cavallo vapore. — Nella meccanica industriale si è preso per unità di potenza il *cavallo vapore*, cioè la potenza capace di eseguire il lavoro di 75 *kgm.* in 1 secondo.

Una caduta d'acqua della forza di 50 cavalli può effettuare il lavoro di $75 \times 50 = 3750$ *kgm.* ad ogni secondo. Una macchina a vapore della forza di 10 cavalli può eseguire il lavoro di $75 \times 10 = 750$ *kgm.* ad ogni secondo.

Questa unità di forza dei motori venne adottata in Inghilterra in sul finire del secolo XVIII, quando si inventarono le macchine a vapore. Essa ebbe origine dal fatto, che queste vennero in principio destinate a surrogare il lavoro dei cavalli nelle miniere di carbone, e il costruttore, per assicurare l'effetto di un dato

numero di cavalli, somministrava macchine capaci di eseguire un lavoro alquanto maggiore di quello fino allora eseguito dai cavalli per surrogare i quali esse venivano costruite.

Perciò il cavallo vapore è una forza alquanto maggiore di quella dei cavalli animali.

11. Unità assolute. — Al numero 2 abbiamo definito il chilogrammetro come unità di lavoro meccanico; questa è l'unità correntemente addottata nel *sistema pratico* di misure, sistema nel quale si sono assunte come unità fondamentali arbitrarie, dalle quali poi si derivano tutte le altre, il metro per la lunghezza, il minuto secondo per il tempo ed il chilogrammo per la forza. Oggidì però ha la preferenza sul *sistema pratico*, ed a poco a poco sta diventando di uso corrente, il *sistema* detto *assoluto* (*Sistema C. G. S. centimetro-grammo-secondo*) in cui le unità fondamentali sono una lunghezza, un tempo, ed una massa; e precisamente per la lunghezza il *centimetro* (la centesima parte della lunghezza che alla temperatura di 0° ha il metro di platino preparato da Borda e che si conserva negli Archivi di Parigi), per il tempo il *secondo* (uguale ad $\frac{1}{86400}$ del giorno solare medio), per la massa la *massa* del *grammo* (la millesima parte della massa di platino che costituisce il *chilogrammo prototipo*, pure preparato da Borda e che si conserva negli Archivi di Parigi).

Col sistema pratico si ha l'inconveniente che per poter paragonare le diverse misure occorre tener conto dei luoghi della terra ove le misure stesse si effettuano; infatti la pressione esercitata dal chilogrammo è diversa nei diversi luoghi (pag. 93) e quindi, ad esempio, forze misurate in luoghi diversi ed espresse con lo stesso numero di chilogrammi non sono in realtà uguali. Col sistema assoluto invece le unità addottate hanno sempre e da per tutto lo stesso valore. In esso l'unità di forza fu detta *dine* (dal greco *dinamis*) definita come quella che agendo per un secondo sulla massa di un grammo le imprime l'accelerazione di un centimetro (e sarebbe facile verificare che nei nostri paesi, assumendo per l'accelerazione di gravità il numero tondo di 980 centimetri, 1 *dine* $= \frac{1\ gr}{980}$). L'unità di lavoro fu detta *ergon* (dal greco *ergon*) definita come il lavoro fatto da una dine quando fa percorrere lo spazio di un centimetro al suo punto di applicazione (e sarebbe facile verificare che nei nostri paesi 1 *kgm* $= 9{,}8 \cdot 10^7$ *ergon*). Al numero 10^7 *ergon* si è dato il nome di *Ioule*. L'unità di potenza (lavoro nell'unità di tempo) è *un ergon al secondo*, ma poichè tale unità sarebbe troppo piccola pei bisogni della pratica si è addottato nelle industrie come unità di potenza il lavoro di *un Ioule al secondo*, unità a cui fu imposto il nome di *Watt*, (e sarebbe facile verificare che nei nostri paesi 1 cav. vap. $= 735$ *Watt*).

$(\mathcal{E} = \delta \cdot cm)$

§ 34. Forza viva di una massa in moto.

1. Lavoro di una forza che comunica velocità ad una massa. — Sovente il lavoro di una forza consiste nel comunicare ad un corpo una velocità. Tale è il caso, per es., del lavoro di un muratore che getta mattoni in alto. Così pure nel principio del moto di un convoglio, o di una nave a vapore, il lavoro di questo consiste non solo nel vincere l'attrito e la resistenza dell'aria, ma anche nel comunicare loro una certa velocità. E se un corpo fosse perfettamente libero, in guisa che non si dovesse vincere alcuna resistenza esterna nel muoverlo, tutto il lavoro consisterebbe nel comunicare al medesimo velocità. Il che è anche un lavoro, perchè ogni corpo presenta per inerzia una resistenza al moto e per acquistarla richiede che agisca su di esso una certa forza per un dato spazio.

Tale lavoro cresce evidentemente colla massa e velocità da comunicarsi al mobile, e si dimostra che *è misurato in chilogrammetri dalla metà del prodotto della massa pel quadrato della velocità.*

2. Formola relativa. — Rappresentando:

con F la forza,
» s lo spazio lungo il quale essa agisce,
» M la massa che muove,
» v la velocità che comunica a questa,

si ha l'eguaglianza:

$$\mathrm{F}\,s = \frac{1}{2}\,\mathrm{M}\,v^2.$$

3. Dimostrazione. — Supponiamo la forza continua costante, poichè il lavoro di una forza variabile equivale a quello di una forza media costante, come lo spazio percorso con velocità variabile equivale a quello percorso con velocità media costante.

Ora se una forza costante F agisce per lo spazio s, essa fa un lavoro F s.

Ma se M è la massa del corpo su cui agisce la forza, e v la velocità che essa produce nel tempo t, si ha:

$$F = \frac{M\,v}{t} \text{ (pag. 92)},$$

$$s = \frac{a}{2}\,t^2 \text{ (pag. 80)},$$

in cui a è l'accelerazione prodotta dalla forza continua costante.

Moltiplicando queste eguaglianze membro a membro, si ha:

$$F\,s = \frac{M\,v}{t} \times \frac{a}{2}\,t^2 = \frac{M\,v\,a\,t}{2}.$$

Ma $a\,t = v$ (pag. 80), quindi sostituendo risulta:

$$F\,s = \frac{M\,v^2}{2}.$$

Per es., per comunicare ad un proiettile del peso di 10 *kg.* una velocità di 500 *m.* per secondo, la forza espansiva dei gaz che nascono dalla accensione della polvere deve eseguire un lavoro di 125000 chilogrammetri.

Infatti in questo caso, ritenendo per semplicità $g = 10$, si ha (pag. 93):

$$M = \frac{P}{g} = \frac{10}{10} = 1,$$

$$v = 500 \text{ } m.,$$

e quindi:

$$F\,s = \frac{1}{2}\,M\,v^2 = \frac{1}{2} \times 1 \times 250000 = 125000 \text{ } kgm.$$

4. Forza viva di una massa in moto. — Una massa in moto può eseguire lavoro, cioè vincere resistenze di diverse sorta nel ritornare in quiete. Così un proiettile in moto nel ritornare in quiete può lacerare più o meno profondamente le corazze delle navi e altri materiali che incontra sulla sua via; l'acqua scorrente o cadente può mettere in moto i meccanismi delle officine, l'aria in moto, cioè il vento, può schiantare gli alberi e spingere le navi; un convoglio in moto, cessata l'azione del vapore, può percorrere più di 1 *km.* vincendo l'attrito e la resistenza dell'aria.

Dunque una massa in moto può vincere resistenze di diverse sorta lungo un certo spazio, cioè può eseguire una certa quantità di lavoro, come se fosse un animale, lavoro di cui non è capace la stessa massa quando non ha il movimento.

Perciò si denomina *forza viva* di una massa in moto: *la quantità di lavoro che essa può eseguire in grazia del suo moto.*

Montgolfier diceva che la forza viva è quella che si paga, in questo senso, che una massa in moto può eseguire lavoro, cioè vincere resistenze lungo un certo spazio, il che ha un valore che viene pagato nell'industria, perchè mediante il medesimo si può trasformare la materia, il che ne aumenta il valore.

Tale quantità di lavoro è uguale a quella che si dovette eseguire per comunicare alla massa la velocità che essa possiede, perchè il lavoro eseguito rimane per così dire immagazzinato nella medesima per inerzia, per modochè essa può eseguire eguale lavoro ritornando in quiete.

Perciò è anch'essa *misurata in chilogrammetri, dalla metà del prodotto della massa pel quadrato della sua velocità.*

5. Formola relativa. — Rappresentando:

con R la resistenza,
» s lo spazio,
» M la massa,
» v la sua velocità.

si ha l'eguaglianza: $$\mathrm{R}\,s = \frac{1}{2}\,\mathrm{M}v^2.$$

6. Dimostrazione. — Supponiamo che un corpo di peso P abbia una velocità v diretta dal basso in alto; esso si solleverà ad una certa altezza s, e quindi mediante la velocità che possiede farà il lavoro $\mathrm{P}\,s$.

Ora se noi esprimiamo l'altezza s mediante la velocità v, abbiamo

$$s = \frac{v^2}{2g} \text{ (pag. 77).}$$

E se esprimiamo il peso P mediante i suoi fattori che sono la massa M e l'accelerazione g della gravità, abbiamo:

$$\mathrm{P} = \mathrm{M}\,g \text{ (pag. 93).}$$

Moltiplicando queste eguaglianze membro a membro, si ottiene:

$$\mathrm{P}\,s = \mathrm{M}\,g\,\frac{v^2}{2g} = \frac{\mathrm{M}\,v^2}{2}.$$

Se la resistenza vinta per lo spazio s invece di essere costituita dal peso P del corpo fosse un'altra qualunque R dello stesso valore, il lavoro eseguito sarebbe sempre

$$R\,s = \frac{1}{2} M\,v^2 .$$

7. Prove sperimentali. — La proporzionalità della forza viva al quadrato della velocità è provata dalle esperienze eseguite coi proiettili. Infatti, se due proiettili hanno la stessa massa e le velocità 1 e 2 i numeri di tavole che esse forano sono proporzionali ai quadrati delle dette velocità, cioè stanno fra loro come 1 a 4.

§ 35. Energia cinetica e potenziale. Conservazione della energia.

1. Energia cinetica e potenziale. — Chiamasi oggidì *energia: l'attitudine o capacità di produrre lavoro*. Però si debbono distinguere due forme principali di energia: l'acqua scorrente o cadente, il vento, un proiettile spinto, hanno energia di movimento, la quale dicesi in tal caso anche *energia cinetica* o *forza viva*; quella invece di un ghiacciaio sulla vetta di un monte, quella di una molla tesa, ossia in generale di un corpo che non essendo attualmente in moto è però in condizioni di poterlo acquistare in virtù della sua posizione rispetto ad altri corpi o della posizione mutua delle sue parti, chiamasi *energia di posizione* o *potenziale*.

2. Principio della conservazione dell'energia. — Quando i muratori eseguiscono il lavoro di sollevare una pietra di balcone ad una certa altezza mediante un sistema di carrucole debbono consumare una parte della propria capacità di eseguire lavoro, cioè della loro energia muscolare. Ora questa energia che viene a mancare negli operai che hanno eseguito quel lavoro è forse annientata?

Per rispondere a tale domanda osserviamo che la pietra sollevata possiede un'energia potenziale che non aveva quando era in basso, la quale è espressa in chilogrammetri dal prodotto del suo peso per l'altezza a cui venne sollevata, e che questa energia potenziale può convertirsi in una quantità equivalente di energia cinetica nella caduta della pietra da quell'altezza a cui venne sollevata.

Dunque l'energia muscolare degli operai la quale venne consumata nella produzione di quel lavoro non è annientata, ma si è solo trasformata in una certa quantità di energia potenziale.

Però la quantità di questa non è precisamente eguale a quella consumata nel detto lavoro, perchè una parte di essa venne consumata nel vincere altre resistenze, come l'attrito negli assi delle puleggie. E che cosa è avvenuto di questa parte? Essa si è trasformata in calore, poichè tutti sanno che nello strofinamento di due corpi si sviluppa calore per l'urto e lo scuotimento che avviene nelle molecole superficiali.

E il calore si deve pure considerare come un'energia cinetica molecolare, cioè come energia di movimento delle particelle della materia, poichè noi vediamo svilupparsi questa energia ogni qualvolta si scuotono le molecole dei corpi, siccome avviene nello strofinamento, nella percussione e nella condensazione, e tale energia si può anche misurare in chilogrammetri siccome vedremo nello studio della medesima.

Ora se si misura in chilogrammetri l'energia potenziale della pietra sollevata, e l'energia cinetica molecolare costituita dal calore sviluppato per l'attrito delle carrucole sui loro assi, e per lo strofinamento delle funi, e per la resistenza dell'aria, e si sommano tali energie, si trova che la loro somma equivale all'energia consumata.

Parimenti, quando si solleva l'acqua mediante una pompa, si deve consumare energia cinetica, la quale non è annientata, ma si trasforma in una certa quantità di energia potenziale rappresentata dall'acqua sollevata, e di energia cinetica rappresentata dal calore sviluppato dall'attrito dello stantuffo, ecc., e la somma di queste energie equivale a quella cinetica consumata.

Quindi si deve ammettere che, come la materia è indistruttibile, e nelle sue metamorfosi chimiche la quantità totale di essa non varia, perchè il peso di un composto è sempre eguale alla somma dei pesi dei componenti, così pure l'energia od attività della materia è indistruttibile, e può solo subire metamorfosi, senza che la quantità totale di essa subisca aumento o diminuzione, ovvero che la *somma dell'energia dell'universo è costante*.

È questo il gran *principio della conservazione dell'energia*, che venne ottenuto per induzione dall'osservazione dei fenomeni fisico-chimici, e le cui deduzioni sono sempre confermate dall'esperienza. Perciò lo si considera come il supremo principio, e la più grande conquista della scienza moderna.

§ 36. La leva.

1. Le macchine. — Per eseguire lavoro si adoperano il più soventi dei congegni detti *macchine*, che sono: *corpi, o combinazioni di corpi, mediante cui una forza può eseguire un determinato lavoro*. Così il muratore, mediante una spranga di ferro che chiama il *palanchino*, può eseguire il lavoro di sollevare un macigno, meglio che se tentasse di sollevarlo direttamente. Parimenti mediante le macchine a vapore l'energia denominata *calore*

può eseguire il lavoro di mettere e conservare in movimento le vetture di un convoglio, o una nave, o i meccanismi di una officina.

Nelle macchine la forza che produce il lavoro si dice *potenza*, e quella che lo consuma si dice *resistenza*.

Per es., in una macchina a vapore la potenza è la forza espansiva del vapore acqueo, e la resistenza può avere diverse forme secondo la natura del lavoro che si fa eseguire alla macchina.

Oltre alle resistenze speciali alle diverse macchine ve ne sono altre più generali, quali l'*attrito*, la *resistenza dei mezzi* e la *rigidezza delle funi*. Nello stabilire le condizioni generali dell'equilibrio nelle macchine si fa dapprima astrazione da queste resistenze, il cui effetto si considera poi a parte.

2. Macchine semplici. — Tutte le macchine, per quanto complicate, risultano dalla combinazione di un piccolo numero di macchine, dette *semplici*, le quali sono: la *leva*, la *carrucola*, l'*asse nella ruota*, il *piano inclinato*, la *vite* e il *cuneo*.

3. Leva. — I muratori e selciatori, per muovere grosse pietre, usano una spranga di ferro che è appunto una leva. Essi raggiungono il loro scopo in due maniere.

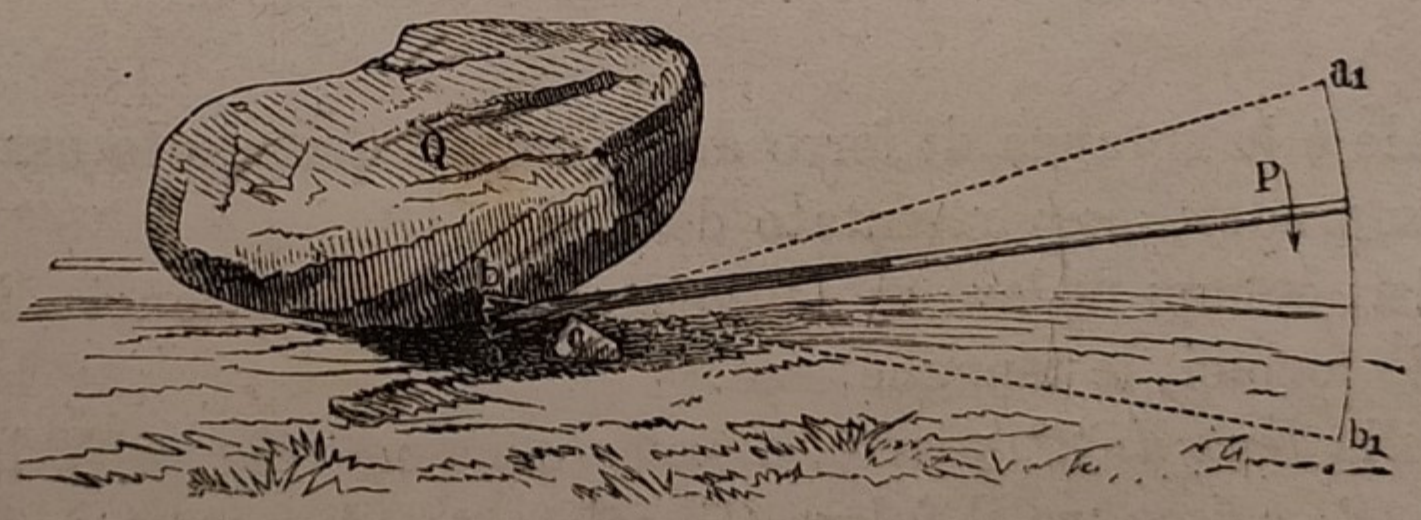


Fig. 48.

Il più sovente la appoggiano sopra una pietra (*c*, fig. 48) in un punto vicino all'estremità inferiore (*a*), che fanno avanzare alquanto sotto il peso (Q) che vogliono sollevare, e poi abbassando l'estremità superiore della leva (come indica la freccia P), sollevano l'inferiore (*a*) e con questa il peso.

Oppure i muratori fanno avanzare l'estremità inferiore (*a*) sotto il peso (Q) che vogliono sollevare, e appoggiano quell'estre-

mità al suolo, indi sollevando il capo superiore (P) della leva, sollevano pure il peso.

In ambi i casi la leva non viene fatta scorrere, ma solo girare alquanto attorno al suo punto di appoggio, che si dice *fulcro* o *ipomoclio*, e la leva si definisce in generale: *una spranga, o corpo rigido, su cui agiscono due forze (potenza e resistenza) che tendono a farlo girare in senso contrario attorno ad un punto fisso detto fulcro.*

4. Tre generi di leva. — Secondo la posizione rispettiva del fulcro e dei punti di applicazione della potenza e della resistenza si distinguono tre generi di leva.

Dicesi *leva di* 1° *genere* o *interfissa*, quella in cui il fulcro (F, fig. 49) giace fra i punti (A, B) d'applicazione della potenza (P) e della resistenza (R).

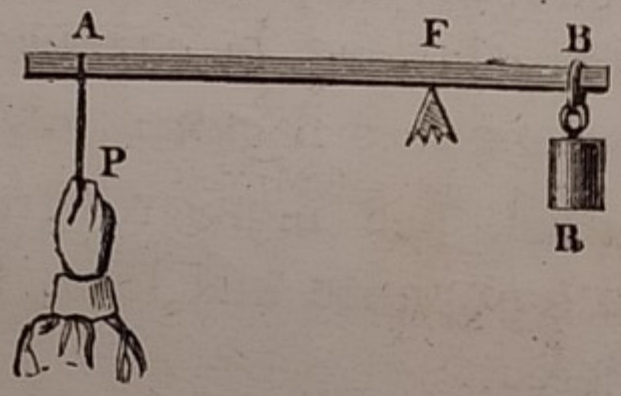


Fig. 49.

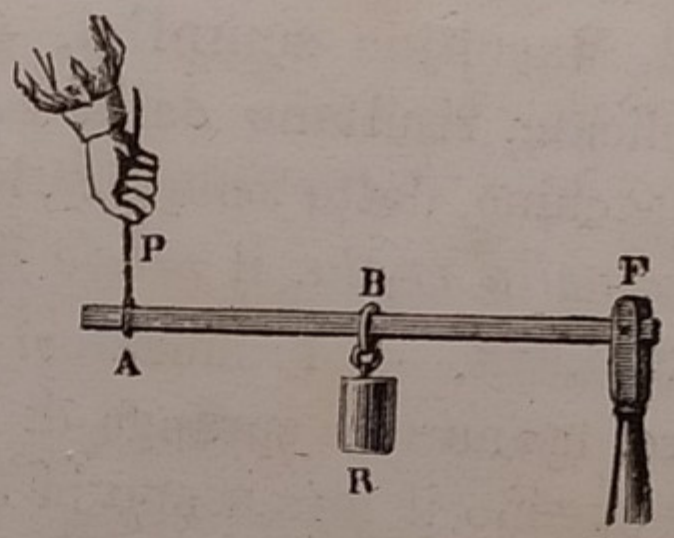


Fig. 50.

Tale è la spranga di ferro dei muratori quando la usano nel modo sopradetto rappresentato dalla fig. 48.

Altri esempi di leve di 1° genere sono: la bilancia, la stadera, le forbici, le tenaglie, ecc.

Nella *leva di* 2° *genere*, o *interresistente* (fig. 50), la resistenza (R) agisce tra il fulcro (F) collocato ad una estremità e la potenza (P) applicata all'altra. Così la spranga di ferro dei muratori viene usata come leva di 2° genere quando la usano nella seconda maniera descritta.

Altri esempi di leve di 2° genere sono i coltelli a cerniera per tagliare paglia, o sigari, o pane, lo schiaccialimoni e lo schiaccianocciole, i remi di una barca (fig. 51), i quali hanno il fulcro nell'acqua, la resistenza in mezzo, nella barca che deve essere mossa, mentre la potenza è la mano del rematore; nel

carretto a ruota si ha pure una leva di 2° genere, il cui fulcro è nell'asse della ruota, la resistenza è nel peso collocato nella cassa, e la potenza è la mano che solleva le due stanghe.

Quando due uomini portano un peso per mezzo di una stanga, ciascuno di essi ne porta una parte mediante una leva di 2° genere, il fulcro giace nella mano, o sulla spalla dell'altro.

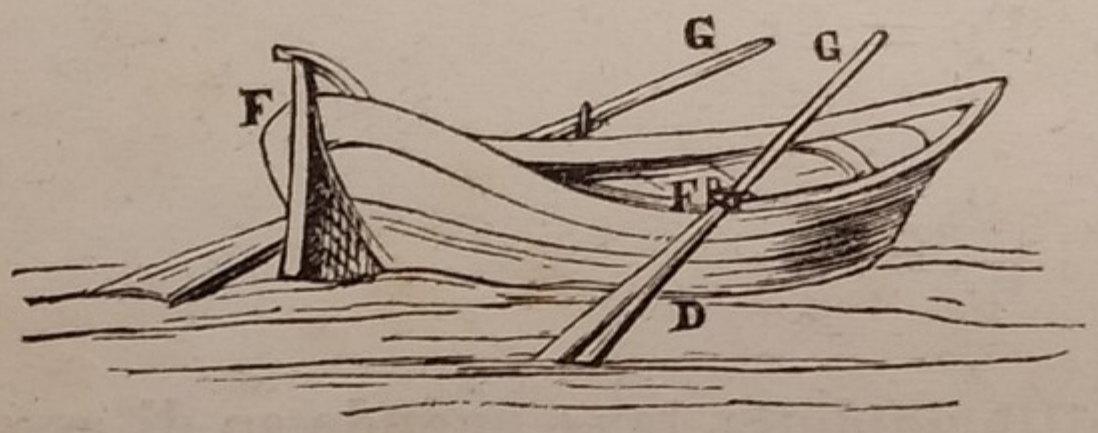


Fig. 51.

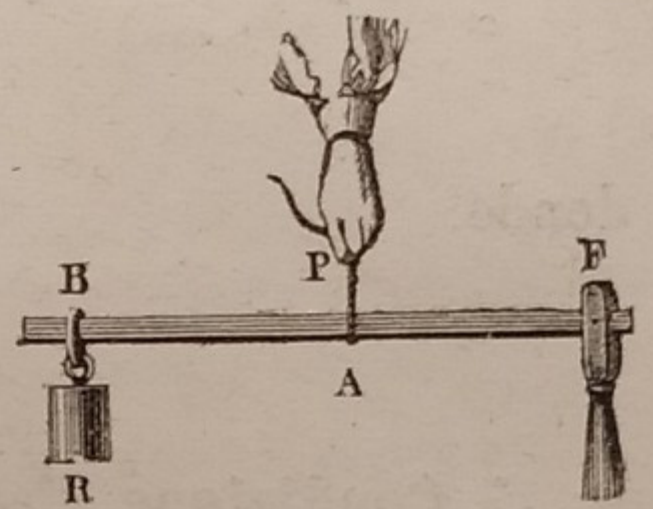


Fig. 52.

Finalmente dicesi *leva di 3° genere*, o *interpotente*, quella in cui la potenza (P, fig. 52) agisce tra il fulcro (F) e la resistenza (R); tali sono i pedali degli organi, nei quali il fulcro trovasi all'estremità inferiore, la potenza è il piede che preme il pedale tra il fulcro e la resistenza, costituita dal registro che viene mosso, il quale è congiunto col pedale alla sua estremità superiore.

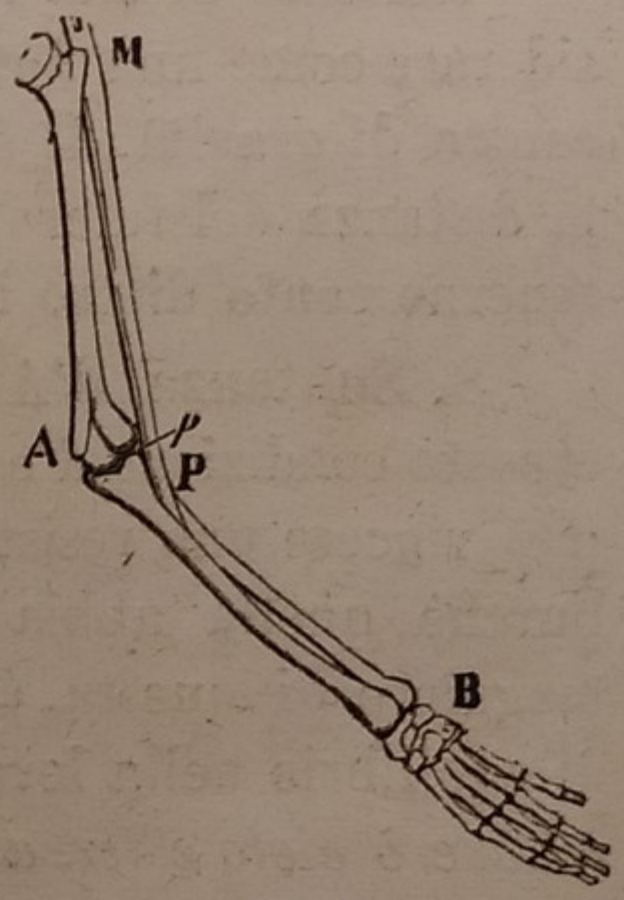


Fig. 53.

Sono pure leve di 3° genere le estremità articolate degli animali, nelle quali il fulcro (fig. 53) giace nell'articolazione (A), la potenza è il muscolo (MP), che si attacca vicinissimo al fulcro, mentre la resistenza è costituita dal peso dell'antibraccio (AB) e della mano.

Infine ogni leva può essere *rettilinea*, che è la forma più frequente, o *curvilinea*, come le tanaglie; od *angolare*, come le chiavi, i manubri delle pompe; ed anche avere la forma di ruota, come la carrucola.

5. Condizione d'equilibrio della leva. — Ora, la condizione perchè le due forze applicate alla leva si facciano equilibrio si è che le *grandezze delle due forze siano in ragione inversa dei rispettivi bracci di leva.*

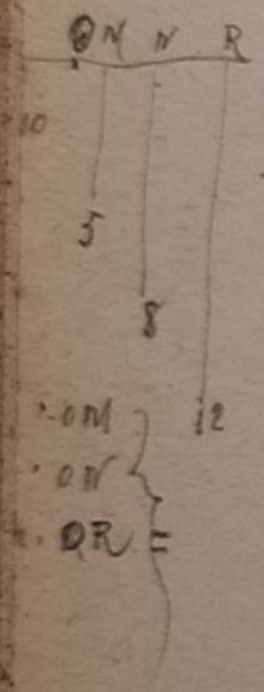
6. Dimostrazione razionale. — Dalla teoria dei momenti di rotazione (§ 22) sappiamo che per l'equilibrio delle due forze rispetto al fulcro debbono i momenti di rotazione delle forze stesse essere uguali e contrarii. Quindi rappresentando rispettivamente

con P ed R la potenza e la resistenza,
e con p ed r i rispettivi bracci di leva si avrà:

$$Pp = Rr,$$

donde:

$$\frac{P}{R} = \frac{r}{p}.$$



7. Condizione d'equilibrio della leva quando su di essa agiscono più forze. — Se su di una leva agiscono più forze vale la seguente legge generale: *Una leva è in equilibrio sul suo fulcro, quando la somma dei momenti di tutte le forze che tendono a farla girare in un senso è eguale alla somma dei momenti di tutte le forze che tendono a farla girare in senso contrario.*

Nel caso di una leva reale dotata di peso, questo si può considerare come una forza eguale a tal peso, ed applicata nel suo centro di gravità. Il suo momento sarà il prodotto del peso per la distanza del fulcro della sua direzione, e riesce quindi facile tenerne conto dietro il precedente enunciato.

8. Sentenza d'Archimede relativa alla leva. — Dalla esposta condizione d'equilibrio della leva risulta che una forza 1 può vincere una resistenza 10, 100, 1000, ecc. volte maggiore, purchè quella abbia un braccio di leva 10, 100, 1000 volte maggiore di questa. Quindi Archimede che scoprì la condizione di equilibrio nella leva disse: *Dammi un punto di appoggio e muoverò cielo e terra* (*).

9. Aurea regola della meccanica. — Indichiamo con S, s gli spazî percorsi dai punti di applicazione della potenza P e della resistenza R nelle loro direzioni, i quali, nel caso di una leva rettilinea e di forze perpendicolari a questa, son rappresentati dagli archi descritti dai detti punti di applicazione. Siccome questi archi

---

(*) *Da ubi consistam et caelum terramque movebo.*

sono proporzionali ai loro raggi, indicando questi per brevità colle lettere p, r, si ha la proporzione:

$$\frac{S}{s} = \frac{p}{r}.$$

Ma dalla condizione d'equilibrio della leva si ha:

$$\frac{p}{r} = \frac{R}{P},$$

e quindi:

$$\frac{R}{P} = \frac{S}{s},$$

la quale esprime *che il rapporto della potenza alla resistenza in una leva è, non solo inverso di quello dei rispettivi bracci, ma anche di quello dei rispettivi spazi che debbono percorrere i loro punti di applicazione nel caso del moto.*

Per es., se la potenza è 100 volte minore della resistenza, il suo spostamento diviene 100 volte maggiore.

Tale proporzione si verifica in tutte le macchine, e chiamasi l'*aurea regola della meccanica.*

Si osservi ora che i prodotti R s e P S rappresentano rispettivamente il lavoro della resistenza e quello della potenza (pag. 115), e che quindi nella macchina in moto uniforme il lavoro della potenza è uguale a quello della resistenza, relazione che si verifica pure in tutte le altre macchine.

Dunque con queste non si defrauda la natura creando del lavoro, o producendone in una quantità maggiore di quella che se ne produrrebbe senza di esse; giacchè se nell'equilibrio una forza piccola ne controbilancia una grandissima, quando si passa al moto, e quindi al lavoro, si ha che *quanto si guadagna di forza* (vincendo una resistenza maggiore della potenza), *altrettanto si allunga lo spazio* (della potenza rispetto a quello della resistenza) *e quindi si perde nella velocità* (della resistenza).

10. Vantaggi dei diversi generi di leva. — Quando per mezzo di una data potenza si equilibra una resistenza maggiore di essa si dice che la macchina presenta un *vantaggio,* e questo è *misurato dal rapporto della resistenza alla potenza.*

Ora dalla condizione d'equilibrio della leva (pag. 126):

$$\frac{P}{R} = \frac{r}{p},$$

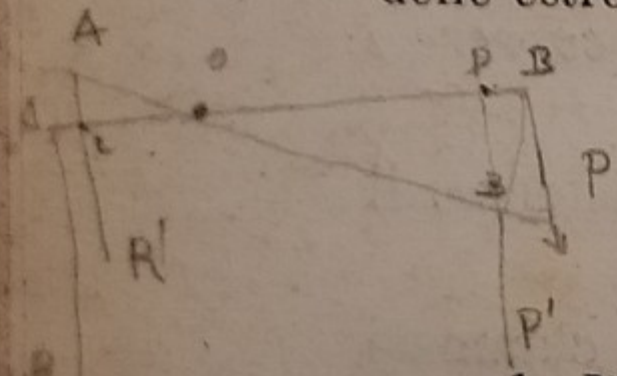
si ricava:

$$\frac{R}{P} = \frac{p}{r},$$

la quale proporzione esprime che il vantaggio in una leva è eguale al rapporto del braccio della potenza al braccio della resistenza.

D'onde consegue che la leva di 1° genere, o interfissa, può vantaggiare tanto la potenza quanto la resistenza, secondochè quella o questa ha più lungo braccio. La leva di 2° genere, o interresistente, vantaggia sempre la potenza che ha sempre più lungo braccio. La leva di 3° genere o interpotente invece vantaggia sempre la resistenza, che ha sempre più lungo braccio.

Quindi le estremità articolate degli animali, che appartengono al 3° genere, non sono leve che servano a far guadagnare in forza, ma bensì in velocità, perchè una piccola contrazione del muscolo produce un grande spostamento delle estremità dell'organo che esso pone in moto.



§ 37. La carrucola.

1. Descrizione. — *La carrucola, o troclea,* (fig. 54) *è un disco circolare di legno, o metallo, sul cui contorno vi è una scanalatura per accogliere una fune, mediante la quale essa viene fatta girare attorno ad un asse passante pel suo centro, e fisso in una staffa che ha un uncino* (o) *per la sospensione.*

La carrucola prende il nome di *puleggia* quando è costituita da una ruota di metallo, il cui contorno è liscio, e che viene fatta girare sul suo asse mediante una cinghia di cuoio.

Fig. 54.

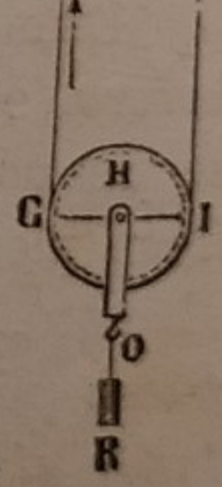


Fig. 55.

2. Carrucola fissa e mobile. — La carrucola si distingue in *fissa* (fig. 54) e *mobile* (fig. 55), secondochè la staffa è fissa ovvero mobile su e giù colla carrucola.

Nella carrucola fissa la potenza (P) e la resistenza (R) agiscono ai capi della fune che passa sulla parte superiore della gola della medesima. Invece nella carrucola mobile la resistenza (R) è appesa alla staffa (HO) e la potenza (P)

agisce ad un capo della fune che avvolge la carrucola inferiormente, di cui l'altro capo è assicurato ad un punto fisso (F). Ordinariamente la fune della carrucola mobile si fa ancora passare sulla parte superiore di una carrucola fissa, allo scopo di far agire la potenza più comodamente dall'alto in basso, anzichè dal basso in alto.

Tanto nella carrucola fissa quanto nella mobile i tratti di fune possono essere paralleli o divergenti; ma noi considereremo solo il caso più semplice e più frequente in cui sono paralleli.

3. Condizione d'equilibrio nella carrucola fissa. — *Nella carrucola fissa, per l'equilibrio, la potenza deve eguagliare la resistenza.*

4. Dimostrazione razionale. — La carrucola fissa si può considerare come una leva continua, di 1° genere, a braccia eguali fra loro, cioè al raggio (FH, fig. 54) della carrucola, che è la distanza del fulcro dalle direzioni della potenza e della resistenza. Perciò dalla teoria della leva risulta immediatamente l'enunciata condizione di equilibrio, perchè essendo uguali i bracci debbono pure essere eguali le forze.

5. Uso della carrucola fissa. — Colla carrucola fissa pertanto non si guadagna in forza. Perciò la si usa solo per mutare la direzione di questa nel sollevare non grandi pesi.

Il quale scopo si ottiene nei pozzi sollevando il secchio col tirare la fune dall'alto in basso anzichè dal basso in alto; nella berta o battipalo, in cui gli operai sollevano il peso tirandolo dall'alto in basso; nelle porte facendole chiudere per mezzo di un peso attaccato ad una fune che scorre su di una carrucola fissata nella loro parte superiore; nelle lumiere e nelle lampade per sollevarle e abbassarle.

6. Condizione d'equilibrio nella carrucola mobile (coi tratti di fune paralleli). — *Nella carrucola mobile si ha l'equilibrio quando la potenza eguaglia la metà della resistenza.*

7. Dimostrazione razionale. — La carrucola mobile si può considerare come una leva il cui fulcro è nel punto (F, fig. 55) di attacco della fune, e per mezzo di questa si può considerare siccome trasportato nel punto (I) in cui la fune si distacca dalla carrucola, cioè ad un'estremità del diametro orizzontale (GI) di questa; la potenza tende a far girare la carrucola attorno a tale

punto con un braccio di leva eguale al diametro stesso, e la resistenza, cioè il peso, tende a farla girare in senso contrario attorno al medesimo punto con un braccio di leva eguale al raggio.

Dunque se r è il raggio della carrucola, cioè il braccio della resistenza, quello della potenza è $2r$. Quindi per la teoria della leva nel caso dell'equilibrio si deve avere:

$$\frac{P}{R} = \frac{r}{2r} = \frac{1}{2},$$

ossia:

$$P = \frac{1}{2}R,$$

il che dimostra l'enunciato.

La stessa condizione d'equilibrio si trova pure considerando che la resistenza è sopportata in parti eguali dai due tratti di fune, l'uno dei quali è attaccato al punto fisso, e l'altro è tirato dalla potenza. Dunque metà della resistenza è sostenuta dal punto fisso cui si attacca una estremità della fune, e solo l'altra metà deve essere sorretta dalla potenza.

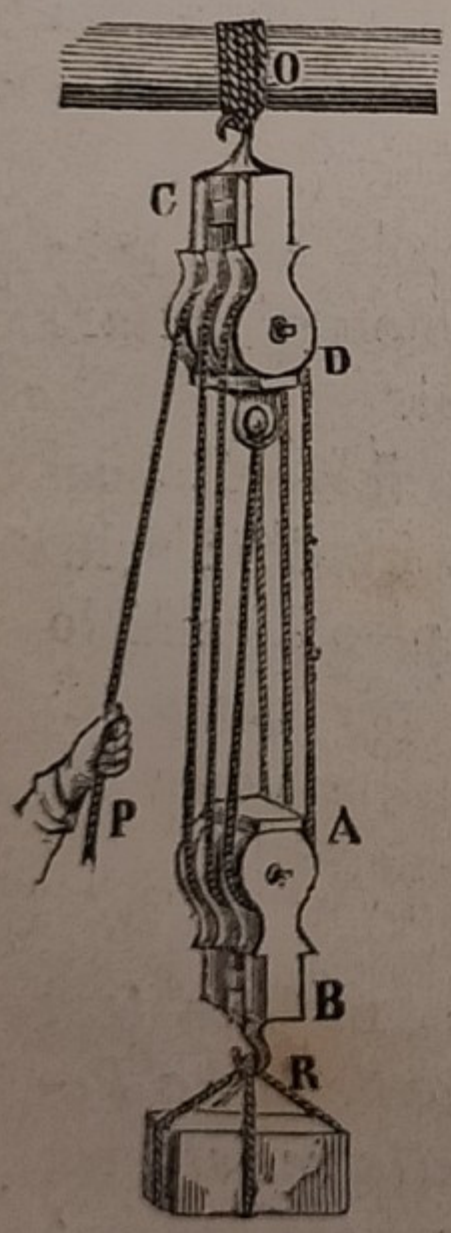


Fig. 56.

8. Taglia o polispasto. — Si usa molto dai muratori, per sollevare grosse pietre, il sistema di carrucole detto *taglia* o *polispasto* (fig. 56), costituito da più carrucole fisse aventi un asse e una staffa comune e da altrettante carrucole mobili, pure con asse e staffa comune, collegate fra loro mediante una fune, che parte dalla staffa delle carrucole fisse, e passa sulla metà inferiore della gola di una prima carrucola mobile, quindi sulla metà superiore d'una prima carrucola fissa, d'onde ritorna sulla metà inferiore della gola di una seconda carrucola mobile, e così di seguito. L'altro capo della fune è tirato dalla potenza.

La fig. 57 rappresenta un'altra disposizione dello stesso sistema.

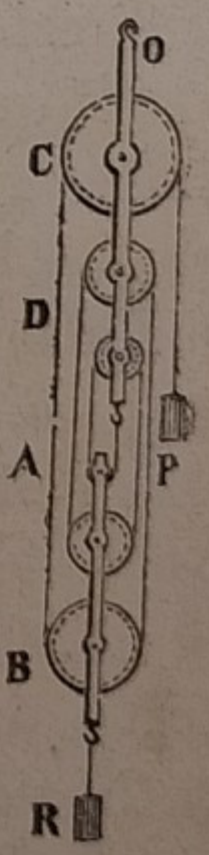


Fig. 57.

9. Condizione d'equilibrio. — *Nel sistema di carrucole detto* taglia *si ha l'equilibrio se la potenza sta alla resistenza come l'unità al numero dei tratti di fune compresi fra i due sistemi di carrucole, ovvero al doppio numero delle puleggie mobili.*

10. Dimostrazione razionale. — La resistenza (R) è sorretta in parti eguali dalla tensione dei tratti di fune compresi fra i due sistemi di carrucole, fisse e mobili, e la potenza, che trattiene il capo (P) della fune che scende dall'ultima carrucola fissa, non ha che da fare equilibrio alla tensione del tratto di fune compreso fra quella e l'ultima carrucola mobile.

In generale quindi se il numero delle carrucole mobili è n si ha:

$$\frac{P}{R} = \frac{1}{2 \times n}.$$

§ 38. La ruota nel cilindro.

1. Descrizione. — *È un cilindro che viene fatto girare sul suo asse mediante una ruota infissa perpendicolarmente al medesimo,* come nelle ruote idrauliche e nei tornii.

Questa macchina riceve il nome di *verricello* quando il cilindro è orizzontale, e viene fatto girare mediante manovelle, come si usa nei pozzi.

Invece la si denomina *àrgano* quando il cilindro è verticale (fig. 58), come usano i muratori, per esercitare trazioni in direzione orizzontale.

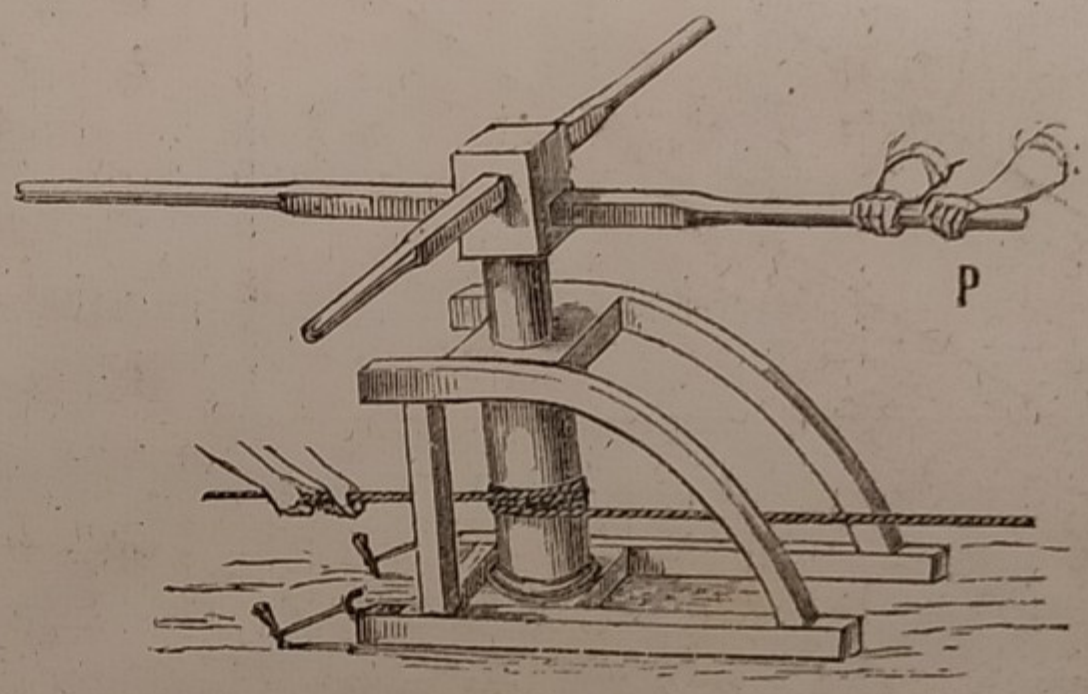


Fig. 58.

Nelle ruote idrauliche la potenza è l'acqua cadente o scorrente che preme i raggi della ruota, e tende a far girare il cilindro in un verso, mentre la resistenza, costituita dai meccanismi che vengono messi in moto dal cilindro girante, si oppone a tale movimento.

Nel verricello e nell'àrgano la potenza è la mano che agisce all'estremità della manovella, o della stanga, e tende a far girare il cilindro in senso contrario a quello in cui tende a farlo girare il peso attaccato alla fune che deve essere avvolta attorno al cilindro.

2. Condizione d'equilibrio. — Supponendo che le forze agiscano in piani perpendicolari all'asse, *per l'equilibrio della ruota nel cilindro si richiede che il rapporto della potenza alla resistenza sia eguale al rapporto del raggio del cilindro al raggio della ruota.*

3. Dimostrazione razionale. — La ruota nel cilindro si può considerare come una leva continua, il cui fulcro è nell'asse del cilindro, il braccio

della potenza è il raggio ρ della ruota, e il braccio della resistenza è il raggio r del cilindro.

Perciò dalla teoria della leva si ha:

$$\frac{P}{R} = \frac{r}{\rho},$$

il che dimostra il teorema.

§ 39. Il piano inclinato.

1. Descrizione. — Chiamasi *piano inclinato: un piano resistente inclinato all'orizzonte.* Per es., quando una tavola cessa di essere orizzontale diviene un piano inclinato; ogni strada non orizzontale è un piano inclinato.

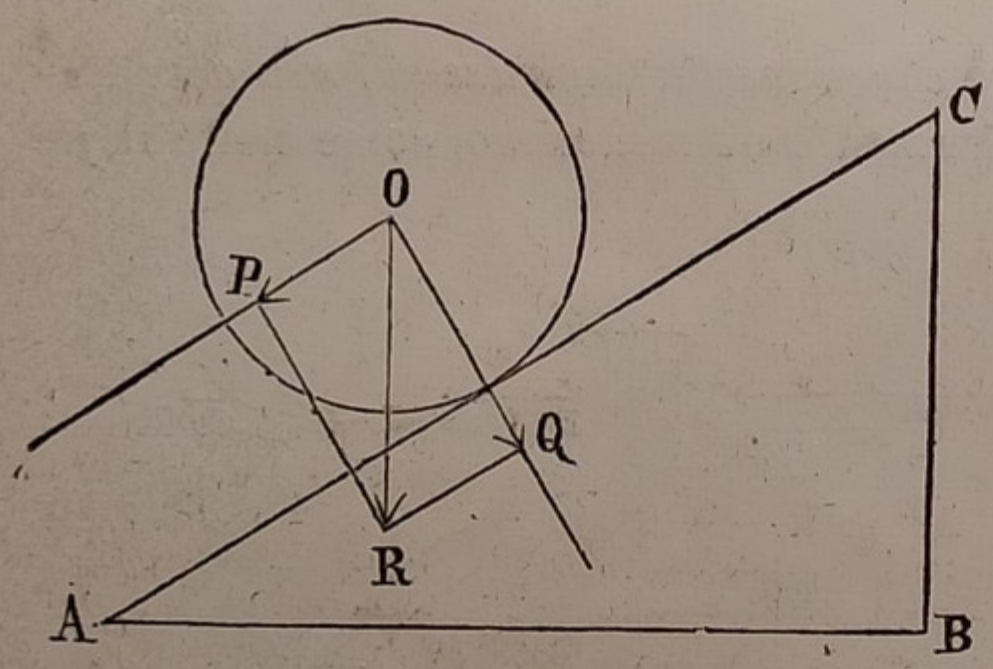


Fig. 59.

Se si interseca un piano inclinato con un piano verticale parallelo ai suoi fianchi, la sezione risultante è un triangolo rettangolo (ABC, fig. 59), e l'ipotenusa (AC) chiamasi. *lunghezza*, il cateto orizzontale (AB), *base*, e il cateto verticale (BC) *altezza* del piano inclinato.

2. Condizione d'equilibrio nel piano inclinato quando la potenza è parallela alla lunghezza. — Ogni piano inclinato ha una posizione intermedia fra quella di un piano orizzontale e quella di un piano verticale; perciò, mentre sul primo il peso di un corpo è totalmente sostenuto, e sul secondo non è punto sostenuto, sopra un piano inclinato il peso di un corpo è sostenuto in parte, e per impedire che esso scenda basta una forza minore del peso del corpo. Ora la forza che impedisce ad un corpo di discendere lungo un piano inclinato, o che lo fa ascendere su questo, può avere qualunque direzione, ma si distinguono siccome casi principali: quello in cui la potenza è parallela alla lunghezza (AC) del piano, e quello in cui essa è parallela alla base (AB).

Di più si suppone che la potenza e la resistenza, costituita dal peso del corpo, agiscano nel piano verticale della sezione, e come nelle altre macchine si fa astrazione dall'attrito.

Ora *quando la potenza è parallela alla lunghezza del piano inclinato* la condizione per l'equilibrio si è che: *il rapporto della potenza alla resistenza sia eguale al rapporto dell'altezza alla lunghezza del piano.*

Per es., se l'altezza è metà della lunghezza, la potenza deve essere metà della resistenza; se l'altezza è $^1/_{100}$ della lunghezza, la potenza deve essere $^1/_{100}$ della resistenza. Quindi su una strada inclinata dell'1 per 100 la forza necessaria per impedire la

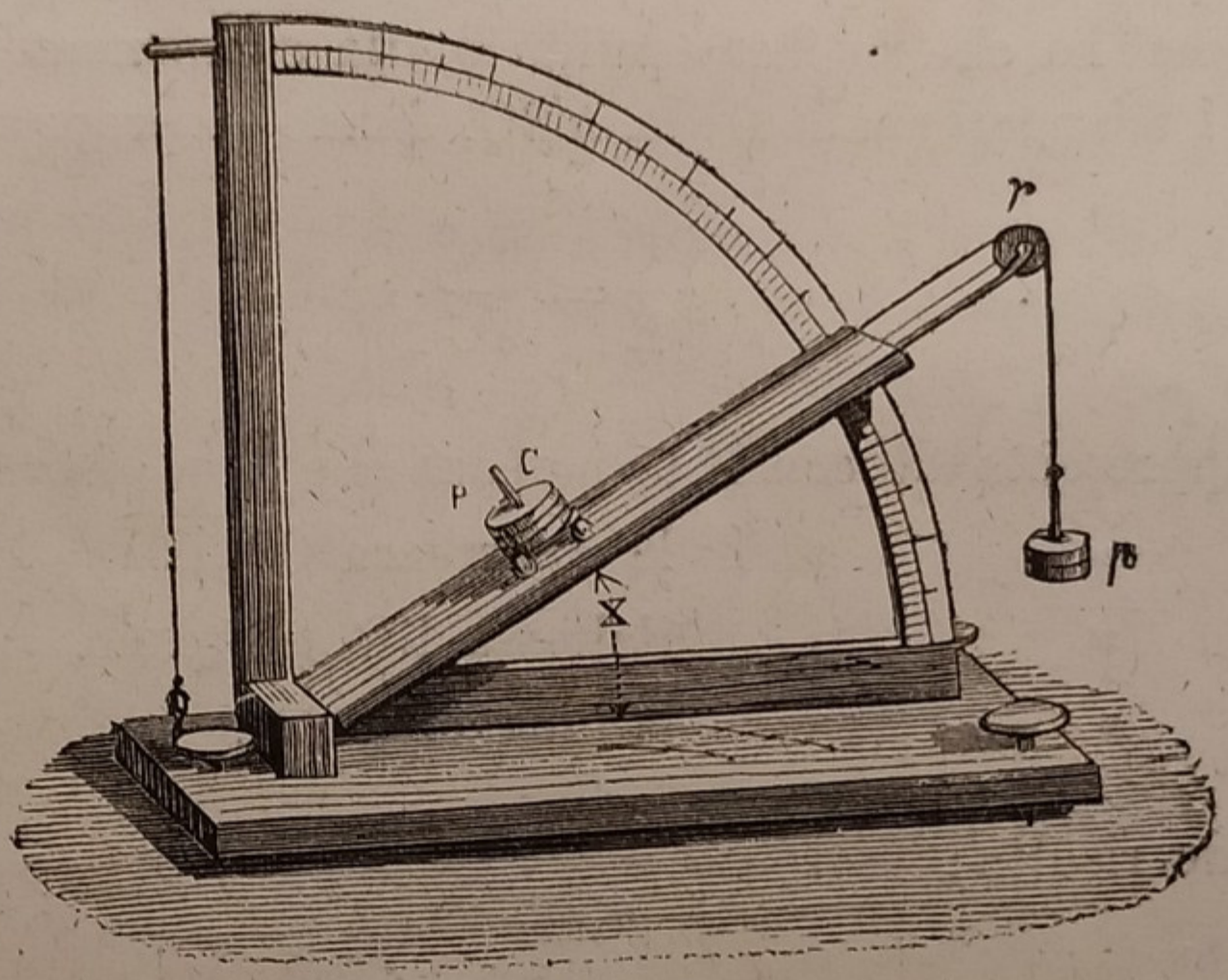


Fig. 60.

discesa di un carro del peso di 1000 *kg* è di 10 *kg*, e la stessa forza è necessaria per mantenere il carro in moto uniforme sul detto piano.

Si può dimostrare sperimentalmente l'enunciato teorema mediante un piano inclinato assai liscio, a cui si possono dare diverse inclinazioni (fig. 60), e sul quale si colloca un mobilissimo carretto, o cilindro di metallo, che viene sostenuto sul piano mediante una funicella passante sulla gola di una carrucola superiore, e a cui si possono attaccare pesi.

I pesi necessari per produrre l'equilibrio con diverse inclinazioni vengono prima determinati mediante il precedente teorema, e si verifica che essi realmente fànno equilibrio.

Se, per es., il peso del carro è 100 *gr.*, e l'altezza $^1/_2$ della lunghezza, siccome avviene quando l'angolo della lunghezza colla base è 30° (*), si trova che per l'equilibrio devesi attaccare alla funicella il peso $^{100}/_2 = 50$ *gr.*

3. Dimostrazione razionale. — Sia O (fig. 59) il centro di gravità di un corpo collocato sul piano inclinato e che può scorrere sul medesimo liberamente, OR il suo peso, ovvero la resistenza che bisognerebbe vincere senza il piano.

Essa produce l'effetto delle sue due componenti, OP parallela alla lunghezza AC del piano, e OQ perpendicolare alla medesima. Questa è equilibrata dalla resistenza del piano, e la potenza non ha che da fare equilibrio alla componente OP.

Ora i triangoli simili OPR, ABC, dànno la proporzione:

$$\frac{OP}{OR} = \frac{BC}{AC}.$$

E rappresentando con P la potenza che deve essere = OP,

» » R la resistenza OR,

» » a l'altezza BC del piano,

» » l la lunghezza AC,

sostituendo risulta:

$$\frac{P}{R} = \frac{a}{l},$$

la quale proporzione esprime il teorema enunciato.

4. Condizione d'equilibrio nel piano inclinato quando la potenza è parallela alla base. — *Se la potenza agisce parallelamente alla base del piano inclinato* (fig. 61), *per l'equilibrio si richiede che: il rapporto della potenza alla resistenza sia eguale al rapporto dell'altezza alla base del piano.*

(*) In un piano inclinato che fa angolo di 30° coll'orizzonte l'altezza BC (fig. 59), cioè la perpendicolare abbassata dalla sommità del piano sulla base, è la metà della lunghezza AC, perchè se si prolunga CB di altrettanto, e poi si congiunge l'estremità del detto prolungamento con A, risulta un triangolo equilatero doppio di ABC, e in cui la perpendicolare AB cade sul mezzo del lato 2BC = AC.

Questo teorema può essere dimostrato sperimentalmente collo stesso apparecchio del caso precedente, nel quale si deve però disporre il braccio mobile portante la carrucola che si trova all'estremità superiore del piano inclinato (fig. 60), in modo che il filo cui si appende il peso che rappresenta la potenza sia parallelo alla base del piano. Così si trova che il peso 50 *gr.* non è più bastante a mantenere il carro pesante 100 *gr.* sul piano, quando la sua inclinazione è 30°, perchè l'altezza di tale piano che è metà della lunghezza non è metà della base, ma un po' maggiore, e perciò si richiede un peso maggiore.

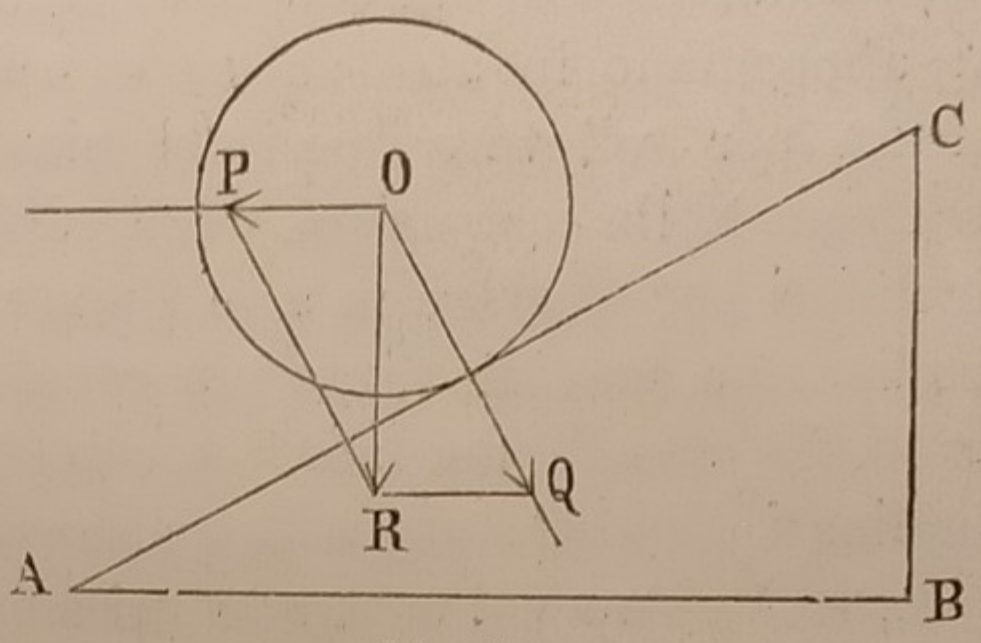


Fig. 61.

5. Dimostrazione razionale. — Il peso OR del corpo (fig. 61) produce l'effetto delle due componenti: OQ perpendicolare alla lunghezza AC, e OP parallela alla base AB del piano. La 1ª componente è equilibrata dalla resistenza di quello, e la potenza deve solo fare equilibrio alla componente OP, e quindi esserle eguale e contraria.

Ora i triangoli simili OPR, ACB danno la proporzione:

$$\frac{OP}{OR} = \frac{CB}{AB}.$$

E rappresentando con P la potenza che deve essere = OP,
» » R la resistenza OR,
» » a l'altezza CB del piano,
» » b la base AB del piano,

sostituendo risulta:

$$\frac{P}{R} = \frac{a}{b},$$

la quale proporzione esprime il teorema.

6. Usi del piano inclinato. — Usasi il piano inclinato, specialmente nella 1ª maniera, per far discendere i pesi dai carri di trasporto sul terreno, e viceversa, ed allora prende ordinariamente la forma di due sbarre di legno assieme congiunte, le quali si appoggiano in alto sul carro e in basso sul suolo. Così pure si usa per sollevare i pesi del piano della via a quello di una bottega. Nella costruzione degli edifizi e nelle cave si usano piani inclinati per portare in alto i materiali. Ogni scala è un piano inclinato a gradini, tanto più comodo quanto meno questi si alzano. Le strade dei monti si compongono di una serie di piani inclinati disposti a zig-zag, o giranti a guisa di vite sul dosso del monte. Mentre sulle strade orizzontali tutto il peso del carro viene sorretto dal suolo, e l'animale non ha che da vincere gli attriti delle ruote sulla via e nei loro assi, e la resistenza dell'aria, invece sulle strade salienti l'animale deve anche vincere continuamente una componente del peso. Perciò si cerca di evitare le grandi pendenze.

7. Vantaggio nel piano inclinato. — La condizione d'equilibrio nel piano inclinato quando la potenza è parallela alla lunghezza essendo espressa dalla proporzione (pag. 132):

$$\frac{P}{R} = \frac{a}{l},$$

il vantaggio (pag. 128) è espresso da quest'altra:

$$\frac{R}{P} = \frac{l}{a}.$$

Perciò si può dire che mentre nella leva vi è un limite al vantaggio, determinato dal fatto che è impossibile fare uso di un braccio troppo lungo per la potenza, perchè diventa flessibile, e di un braccio troppo corto per la resistenza, perchè non permette l'azione di essa, invece nel piano inclinato si può dire che non vi è limite al vantaggio, perchè basta che esso si scosti pochissimo dall'essere orizzontale, perchè la sua altezza sia una frazione piccolissima della lunghezza e quindi il vantaggio diventi grande quanto si vuole.

Ma qui pure si verifica *l'aurea regola della meccanica* esposta per la leva (pag. 126), perchè per sollevare un corpo mediante un piano inclinato in cui l'altezza è $^1/_{100}$ della lunghezza basta bensì una potenza $= {}^1/_{100}$ della resistenza, ma quella deve percorrere uno spazio 100 volte maggiore di questa.

8. Moto di un grave su di un piano inclinato. — Se il corpo appoggiato sul piano inclinato è soggetto soltanto alla azione del suo peso P = O R

(fig. 59) si muoverà come se fosse soggetto alla sola forza costante $F = O P$, data dalla nota relazione (pag. 134):

$$\frac{F}{P} = \frac{a}{l},$$

essendo rispettivamente a ed l l'altezza C B e la lunghezza C A del piano; ossia si muoverà per effetto della componente:

$$F = P \frac{a}{l},$$

acquistando l'accelerazione g' data dalla eguaglianza:

$$g' = g \frac{a}{l},$$

poichè, a parità di massa, le accelerazioni sono proporzionali alle forze (pag. 89).

Dopo aver poi percorso tutta la lunghezza l del piano avrà acquistato la velocità:

$$v = \sqrt{2 g' l},$$

ossia, sostituendo a g' il valore precedente:

$$v = \sqrt{2 g a}.$$

Risulta quindi che: *un corpo il quale passi da un piano orizzontale ad un altro acquista la medesima velocità tanto cadendo liberamente per la verticale quanto scendendo senza attrito per un piano comunque inclinato.*

Se il corpo acquista la medesima velocità acquista anche la stessa energia cinetica (pag. 121) la quale è uguale al lavoro eseguito dal suo peso.

§ 40. La vite.

1. Elica. — Se un pezzo di carta in forma di triangolo rettangolo A C C′ (fig. 62), con un cateto A C′ eguale all'asse di un cilindro A B C, e l'altro cateto C′ C eguale alla circonferenza C della base del cilindro, viene avvolto attorno di questo col cateto A C′ parallelo all'asse del medesimo, l'ipotenusa A C del triangolo si dispone secondo una curva A B C che si dice *elica*, la quale fa un angolo costante col *lato* del cilindro.

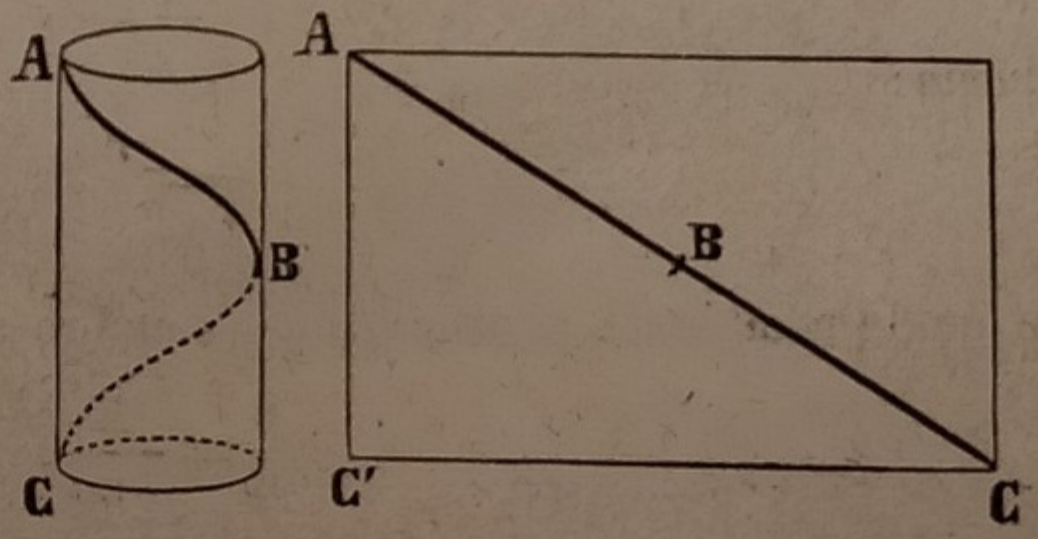


Fig. 62.

Il segmento A C del lato, compreso fra due incontri successivi del medesimo coll'elica, si dice *passo dell'elica*.

2. Vite. — La vite è un cilindro (A B, fig. 63) munito di un rilievo triangolare, o rettangolare, disposto ad elica. Tale rilievo prende il nome di *verme;* il passo (*a b*) dell'elica si denomina *passo della vite*, ed il cilindro stesso col verme denominasi *pane* o *mastio.* A costituir la vite concorre un altro cilindro o prisma cavo (ED), detto *madrevite*, in cui vi è un solco, la cui cavità viene perfettamente occupata dal verme del pane.

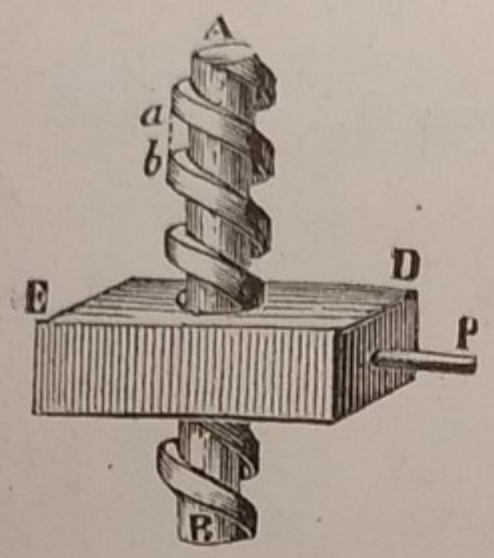


Fig. 63.

Questa macchina si usa in due maniere, cioè, o colla madrevite fissa e il pane mobile, od inversamente col pane fisso e la madrevite mobile. In ambi i casi la parte mobile viene fatta girare attorno all'asse del cilindro, e così essa progredisce o retrocede di un passo nella direzione di quell'asse, per ogni giro della parte mobile attorno all'asse. Sovente la partè mobile viene fatta girare su quella fissa mediante una stanga (P), come nei torchi.

3. Condizione d'equilibrio della vite. — *Per l'equilibrio nella vite si richiede che il rapporto della potenza alla resistenza sia eguale al rapporto del passo della vite alla circonferenza che ha per raggio la distanza del punto di applicazione della potenza dall'asse del cilindro.*

4. Dimostrazione razionale. — Si supponga verticale il cilindro di raggio r e che un punto di peso R riposi sull'elica di passo h; per tenerlo in equilibrio occorrerà una potenza P, altrimenti esso scenderebbe lungo l'elica come per un piano inclinato avente per altezza h e per base la circonferenza $2\pi r$ della sezione retta della superficie cilindrica. Supponendo la P orizzontale e tangente al cilindro, per l'equilibrio si avrà (pag. 135):

$$\frac{P}{R} = \frac{h}{2\pi r}. \qquad (1)$$

Se poi invece di P agisce sul punto una forza p ad essa parallela con un braccio di leva l perpendicolare all'asse del cilindro, allora dovrebbe essere (pag. 126):

$$p\,l = P\,r,$$

donde:

$$\frac{p}{P} = \frac{r}{l}, \qquad (2)$$

la quale combinata (moltiplicando membro a membro) colla (1) dà:

$$\frac{p}{R} = \frac{h}{2\pi l},$$

eguaglianza che esprime l'enunciata condizione d'equilibrio della vite.

5. Usi della vite. — La vite serve ad esercitare grandi pressioni nella direzione del suo asse, siccome nei torchi a vite, nei quali, o è mobile il pane e fissa la madrevite, come in quelli del vino, delle ulive, degli stam-

patori, dei fabbricanti di carta, ecc., ovvero è fissa la vite ed è mobile la madrevite, come nei torchi dei legatori da libri.

Sulla pressione della vite nel senso dell'asse è anche fondato l'impiego della vite per sollevare, come nei piedi a vite di molti stromenti scientifici; per forare, come nei succhielli, nei cavaturaccioli, nell'elice delle navi (inventata nel 1827 da Ressel in Trieste), mediante la rotazione della quale, in un senso o nell'altro, esse procedono innanzi o indietro nell'acqua, come il succhiello e il cavaturaccioli nel legno e nel sughero.

Si utilizza la pressione nel senso dell'asse e il considerevole attrito che agisce in questa macchina nelle viti di assodamento, o di pressione, che si usano in moltissimi strumenti, come nei banchi dei falegnami, nei mobili, nelle armi, nelle vetture, ecc. ecc.

Si applica infine la vite per misurare piccole lunghezze e grossezze, come pure per dividere in parti eguali, nelle *viti micrometriche*, nelle quali la testa della vite porta un disco perpendicolare all'asse e diviso alla periferia in parti eguali, o gradi. Se il n° di questi è 360, e il passo è di 1 *mm.*, uno spostamento angolare di 1° determina uno spostamento lineare di $\frac{1}{360}$ di *mm.* Così si possono misurare dimensioni piccolissime.

§ 41. Il cuneo.

1. Descrizione. — Lo spaccalegna per ridurre un ceppo in pezzi vi fa penetrare a forza di replicati colpi un pezzo di ferro, il quale dicesi *cuneo*, ed ha la forma di un prisma triangolare isoscele (A B C D E F, fig. 64 e 65)

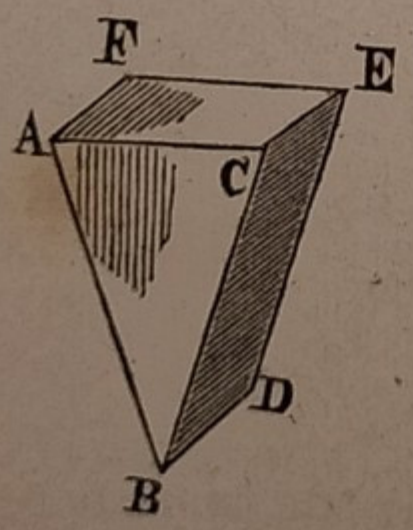


Fig. 64.

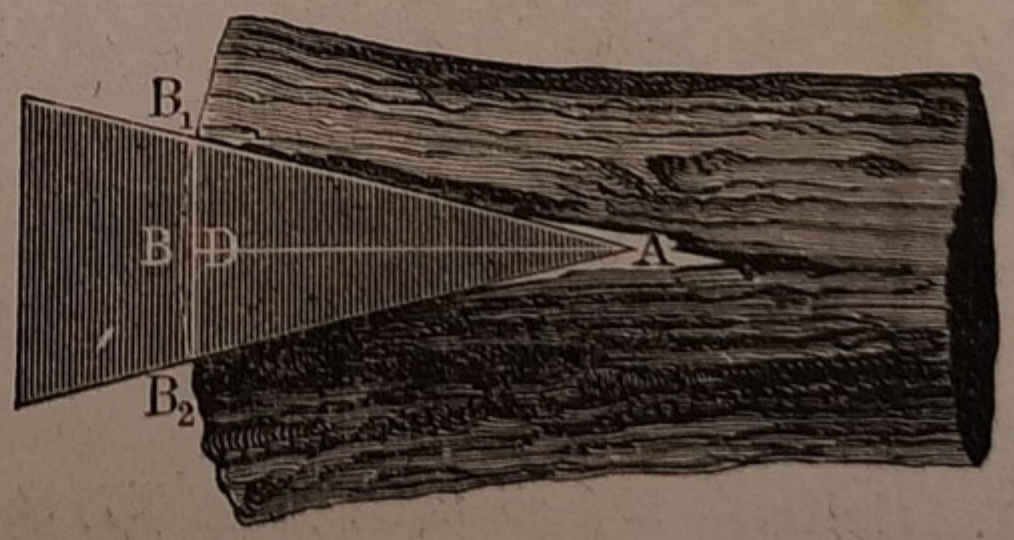


Fig. 65.

con un angolo (A B C) assai acuto, il quale dicesi *filo* o *tagliente*, mentre la faccia (A C E F) opposta al tagliente chiamasi *testa* o *dorso*, e le faccie laterali (B D C E, B D F A) diconsi i *fianchi*.

Esso viene fatto penetrare nel corpo da fendersi per mezzo di colpi che si danno sulla testa, ciascuno dei quali rappresenta la forza detta *potenza*, mentre la *resistenza* è costituita dalle pressioni che esercitano sui fianchi del cuneo le due parti che si vogliono separare.

2. Condizione d'equilibrio. — Per l'equilibrio del cuneo si richiede che *il rapporto della potenza alla resistenza sopra ciascuno dei fianchi sia eguale a quello della testa alla lunghezza del fianco.*

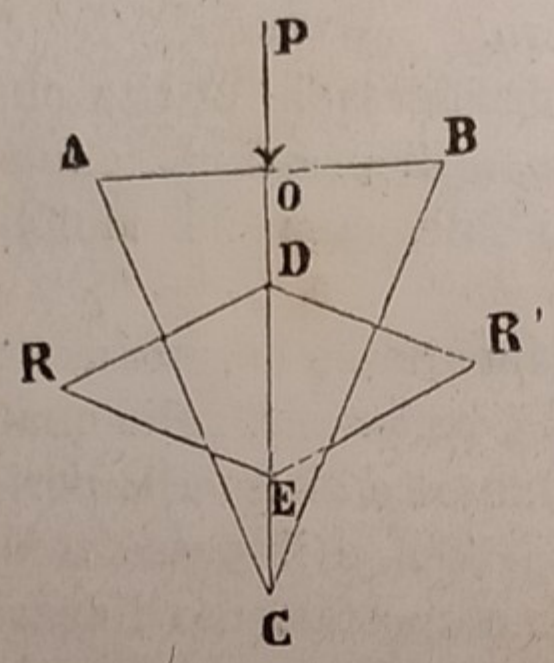


Fig. 66.

3. Dimostrazione razionale. — Sia A B C (fig. 66) la sezione del cuneo perpendicolare agli spigoli laterali, D R, D R′ le due pressioni eguali sopportate dai fianchi del cuneo, perpendicolari a questi, le quali costituiscono la resistenza. Se si costruisce il parallelogramma D R E R′, la diagonale E D rappresenta la risultante di queste due pressioni; essa agisce dal basso in alto, e la potenza deve fare equilibrio alla medesima; cosicchè D E = P, potenza; mentre D R = R, resistenza, o pressione esercitata sopra un fianco.

Ora i triangoli simili E R D, A B C (hanno i lati rispettivamente perpendicolari) danno la proporzione:

$$\frac{DE}{DR} = \frac{AB}{AC}.$$

la quale eguaglianza esprime il teorema.

4. Usi del cuneo. — Tutti gli strumenti da taglio e a punta, come i coltelli, i rasoi, le spade, le lame, le forbici, l'ascia, il vomere dell'aratro, lo scalpello, i chiodi, gli aghi, ecc., sono cunei. Essi penetrano tanto più facilmente nel corpo in cui vengono spinti, quanto minore è la testa e più lunghi i fianchi.

§ 42. Le resistenze passive.

1. Attrito. — Si è già notato (pag. 127) che oltre alle resistenze speciali alle diverse macchine ve ne sono altre generali, che sono: l'*attrito*, la *resistenza dei mezzi* e la *rigidezza delle funi*.

L'attrito è la resistenza che un corpo incontra nel muoversi in contatto con un altro. — Esso è manifestato dal fatto che un corpo il quale riposa su una tavola orizzontale non scende tosto che questa viene inclinata, ma solo quando l'inclinazione raggiunge un certo angolo, che dipende appunto

dalla grandezza dell'attrito, senza del quale il corpo scenderebbe appena la tavola cessa di essere orizzontale, perchè il suo peso non è più totalmente equilibrato (pag. 134), ma lo è solo la componente perpendicolare al piano, mentre la componente parallela a questo lo trascina in basso e lo farebbe muovere se non ne fosse impedita dall'attrito.

2. Cause dell'attrito. — L'attrito ha assai complicata origine; le sue cause principali sono: 1° *le prominenze e depressioni delle superfici fisiche* 2° *l'adesione delle medesime.*

Per la prima causa avviene che le prominenze di un corpo si affondano nelle depressioni dell'altro, e nel movimento succedono degli urti reciproci, e quindi trasformazione del movimento in calore.

Di più nel moto si deve vincere l'adesione, cioè l'attrazione molecolare fra le superfici fisiche a contatto.

3. Attrito radente e volvente. — Si distingue l'attrito *radente*, che è quello di un corpo che striscia in contatto di un altro, come nel moto di una slitta, e l'attrito *volvente*, che è quello di un corpo che rotola in contatto di un altro, come una ruota di vettura sul piano che la sostiene. Questo attrito è manifestamente minore dell'altro, perchè le prominenze del corpo che rotola vengono continuamente sollevate su quelle dell'altro, e così evitato il reciproco urto.

Un caso speciale di attrito radente è quello degli assi delle ruote nei loro fusi, il quale si chiama da alcuni attrito *misto*. Esso differisce dal volvente, perciò che mentre in questo i punti di contatto variano, in quello sono sempre gli stessi. L'attrito misto è alquanto minore del radente.

4. Misura dell'attrito. — Per misurare l'attrito si pone il corpo su di un piano orizzontale e gli si attacca una fune che passa su una carrucola mobilissima e porta all'estremità un bacino. Così si può determinare il peso necessario per mettere il corpo in moto, ovvero, se era già in moto, per mantenerlo in tale stato con velocità costante.

Si può anche gravare il corpo con diversi pesi per determinare l'influenza della pressione sulla grandezza dell'attrito.

5. Leggi dell'attrito. — 1° *L'attrito è proporzionale alla pressione.* — Ciò si intende osservando che col crescere della pressione cresce l'affondamento delle prominenze di un corpo nelle depressioni dell'altro, come pure l'adesione col crescere del numero dei punti di contatto.

Il che si può provare sperimentalmente mediante un piccolo carro che abbia un determinato peso, per es. 100 *gr.* Se per muoverlo su un piano orizzontale, si richiede, per es., una forza di 5 *gr.*, sovrapponendo ad esso 100 *gr.*, cioè raddoppiandone il peso, si trova che per muoverlo si richiede una forza traente di 10 *gr.*

Un'applicazione importante di questa legge venne fatta dall'ingegnere Stephenson, aumentando il peso delle locomotive, per aumentare il loro attrito sulle rotaie, e impedire così lo strisciamento delle ruote che avveniva colle prime locomotive leggiere, per poco che esse avessero a vincere resistenze. Anzi, sulle ferrovie inclinate delle montagne devesi ancora accre-

scere l'attrito con locomotive più pesanti delle ordinarie, e con maggior numero di ruote, per vincere coll'attrito la componente della gravità che tende a farle scendere in basso.

2° *A parità di pressione l'attrito non dipende dall'estensione della superficie di contatto, purchè questa non divenga acuminata o tagliente.* — Per es., per muovere un parallelepipedo di superficie omogenea su un piano orizzontale, si richiede sempre la stessa trazione, sia che esso appoggi sul piano per una delle due faccie maggiori, o minori, o medie. Il che si intende osservando che col crescere dell'estensione della superficie cresce bensì il numero dei punti di contatto, ma diminuisce nella stessa misura la pressione su ogni elemento superficiale, e col diminuire della pressione diminuisce l'attrito.

3° *L'attrito dipende dalla natura dei corpi che sono in contatto e dalle qualità delle loro superfici.* — In generale è minore fra corpi eterogenei che fra corpi omogenei, perchè nell'ultimo caso le ineguaglianze si adattano meglio le une alle altre. Per es., è minore fra l'ottone e l'acciaio, che fra ottone e ottone, acciaio e acciaio. Pel legno è maggiore quando le fibre sono parallele che non quando sono perpendicolari alla direzione del moto.

4° *L'attrito volvente è assai approssimativamente in ragione diretta della pressione ed in ragione inversa del diametro del corpo che rotola.* — Questo attrito è molto minore del radente.

5° *L'attrito è maggiore nel passaggio dal riposo al moto (attrito statico) che nel moto stesso (attrito dinamico); e questo è indipendente dalla velocità del moto.*

6. Utilità dell'attrito. — In grazia dell'attrito noi non scivoliamo ad ogni passo nel camminare, come facilmente ci accade sul ghiaccio, sul quale si sparge sabbia o cenere ad impedire tale effetto, dovuto alla pressione obliqua che il piede esercita sul suolo (pag. 48).

Senza attrito non potremmo salire sui monti, tenere saldamente una fune, e i fili di questa non starebbero gli uni agli altri uniti; sarebbe impossibile l'uso delle viti di assodamento, dei chiodi, ecc.

Senza l'attrito non sarebbero possibili le ferrovie, perchè le ruote della locomotiva, fatte girare dal vapore, striscierebbero sulle rotaie senza progredire, come si è detto (pag. 141).

Ogni ruota di carro viene fatta girare sul suo asse dall'attrito col suolo ed ogni carrucola viene fatta girare sul suo asse dall'attrito colla fune. In generale senza attrito sarebbe impossibile l'uso delle macchine, perchè mediante l'attrito delle cinghie o delle funi si fanno girare le puleggie, le carrucole, si tirano le funi, ecc.

Siccome l'attrito volvente è molto minore del radente, perciò si ottiene grande risparmio di forza, sostituendo quello a questo, mediante cilindri o ruote, come ad es. nei piedi dei mobili; viceversa si trasforma l'attrito volvente delle ruote delle vetture in radente mediante la così detta *scarpa*, per accrescere la resistenza nella discesa. In simile guisa, mediante le morse ed i freni si fa frequente impiego dell'attrito, per impedire o ritardare il movimento delle macchine e dei pesi.

7. Resistenza dei mezzi. — Ogni corpo che si muove alla superficie della terra è immerso, o nell'aria, o nell'acqua, o in altro mezzo, che oppone al suo moto una resistenza più o meno grande, la quale dicesi *resistenza del mezzo.*

Essa proviene in massima parte dall'urto del corpo contro le molecole del mezzo, cui comunica perciò una porzione del suo moto, e in parte minore dallo strofinamento e quindi dall'attrito delle sue superfici con quelle del mezzo a contatto.

8. Leggi della resistenza dei mezzi. — Newton trovò (1680) che *la resistenza del mezzo è proporzionale al quadrato della velocità del corpo;* più esatte ricerche dimostrarono che *per movimenti lenti basta la prima potenza e per assai rapidi movimenti devesi introdurre anche la* 3ª *potenza.*

9. Vantaggi della resistenza dei mezzi. — Quantunque la resistenza del mezzo consumi forza (la forza che muove le navi viene quasi tutta consumata da tale resistenza), tuttavia è appunto in grazia di essa che procedono innanzi i battelli a vapore, tanto quelli a ruote quanto quelli a elice, come pure le navi a remi. Su di essa sono fondati i paracadute, i regolatori del moto nelle macchine, per es. nelle sonerie degli orologi mediante molinelli.

10. Rigidezza delle funi. — Le funi che si adoperano nelle macchine oppongono una certa resistenza al piegamento, che debbono subire attorno alle carrucole, ai cilindri, ecc., la quale dicesi *rigidezza delle funi.* Essa dipende dalle seguenti condizioni:

1° *Dalla materia della fune;*
2° *Dalla torsione dei fili;*
3° *Dalla tensione della fune;*
4° *Dal diametro della fune;*
5° *Dalla curvatura della superficie attorno alla quale la fune si avvolge.*

11. Impossibilità del moto perpetuo. — Dalle considerazioni esposte a proposito delle macchine in moto e dalle nozioni ora riportate sulle resistenze passive appare evidente l'impossibilità del *moto perpetuo* che negli antichi tempi ha preoccupato uomini di ingegno e di poca coltura e che consisterebbe nell'inventare una macchina che mentre eseguisce lavoro non consumi una parte di quello che le si somministra per mantenere costante la sua velocità.

Per esempio, se l'energia cinetica d'un salto d'acqua viene impiegata a sollevare acqua mediante una ruota idraulica ed una pompa, l'energia potenziale dell'acqua sollevata è necessariamente minore dell'energia cinetica consumata in quel lavoro, perchè una parte di questa deve essere impiegata nel vincere gli attriti e la resistenza dell'aria; per cui se quella energia potenziale, ridiventando cinetica nella caduta, viene poi impiegata a sollevare altra acqua, non può più produrre lo stesso effetto di prima, sia perchè è già minore della primitiva, sia anche perchè una nuova parte di essa verrebbe ancora consumata nel vincere le resistenze passive.

§ 43. La bilancia e la stadera.

1. Descrizione. — La bilancia (fig. 67) è uno strumento che serve per la misura esatta dei pesi non molto grandi. Essa consta di tre parti principali, che sono il *giogo* o *flagello*, la *colonna* che lo sostiene, e i *piatti* o *bacini*.

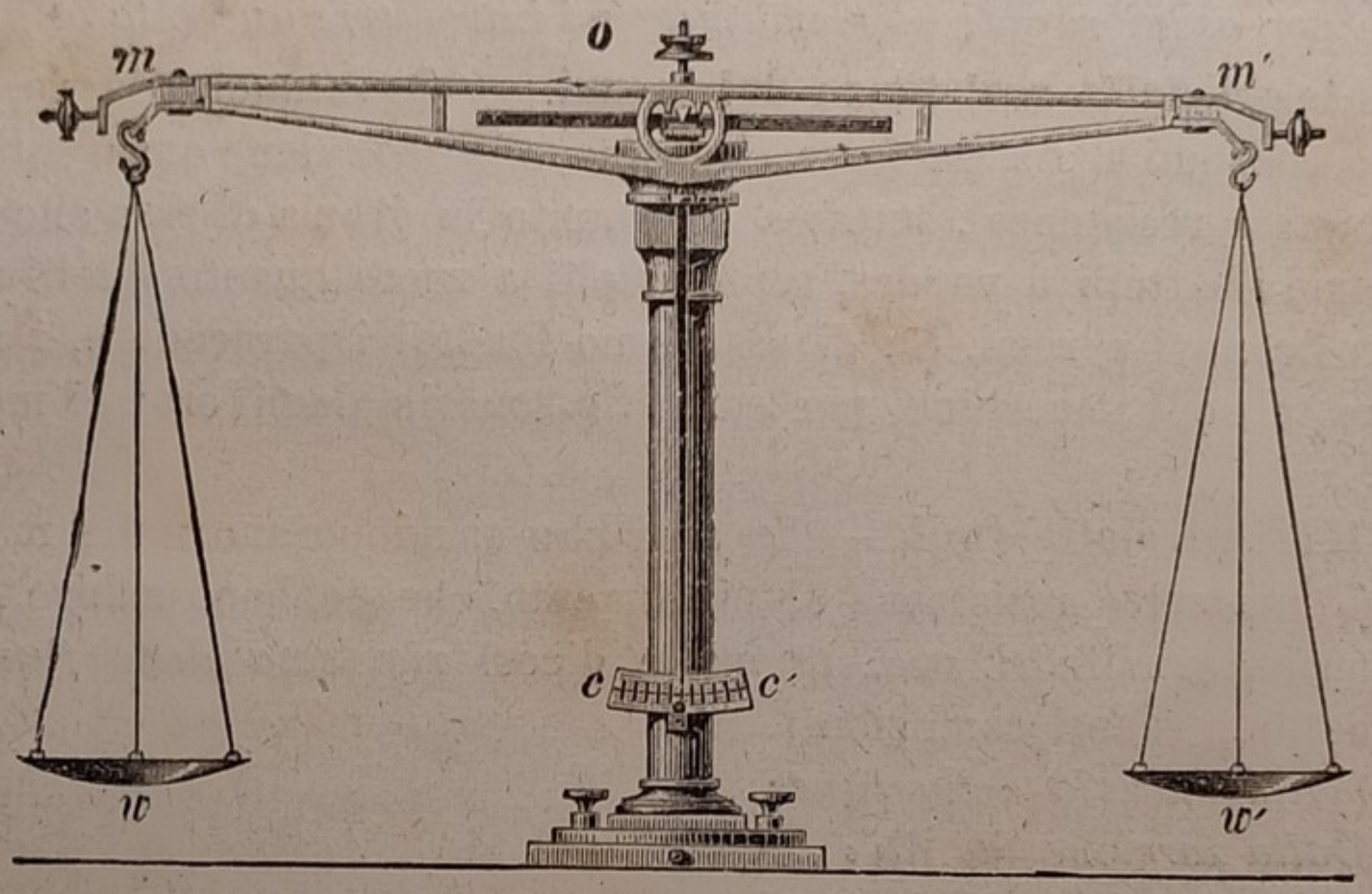


Fig. 67.

Il giogo è una leva di primo genere a braccia eguali, simmetrica rispetto al proprio punto di mezzo, ove è attraversata da un prisma triangolare di acciaio, detto *coltello*, che ha uno spigolo in basso, col quale si appoggia su due piani di acciaio, e di pietra dura (agata) sostenuti da una colonna. Alle estremità del giogo sono appesi i piatti.

Per riconoscere se il giogo è orizzontale esso è munito di un lungo ago, detto *indice* o *giudice*, perpendicolare all'asse di quello, e rivolto in basso, colla punta di fronte ad un arco di cerchio graduato (*ec'*) che ha il centro nell'asse di rotazione del giogo, e l'indice segna lo zero della graduazione quando il giogo è orizzontale, ed è verticale l'asse della colonna che lo sostiene. A tale scopo, lo zoccolo di legno che porta la colonna è munito di viti di livello.

Per conservare il filo del coltello su cui appoggia il giogo,

questo viene sollevato e sostenuto da due forchette quando non si adopera la bilancia.

Infine le bilancie di precisione si tengono riparate entro una cassa a pareti di vetro, in cui si mette un poco di calce viva per mantenervi asciutta l'aria al fine di evitare la ruggine dei pezzi di acciaio.

2. Condizione per la stabilità dell'equilibrio della bilancia. — Una bilancia si trova nella condizione d'equilibrio di un corpo sospeso ad un'asse. Ora tale equilibrio è stabile solo quando il centro di gravità del corpo giace verticalmente sotto l'asse di sospensione (pag. 64). Dunque perchè una bilancia abbia equilibrio stabile sull'asse di sospensione il suo centro di gravità deve trovarsi al disotto del medesimo.

Se il centro di gravità coincidesse coll'asse di sospensione l'equilibrio sarebbe neutro, o indifferente, e potrebbe avere luogo in qualunque posizione del giogo. In tale caso la bilancia dicesi *folle* o *volubile*. Infine se il centro di gravità fosse superiore al punto di appoggio l'equilibrio sarebbe instabile, e il giogo una volta inclinato non verrebbe rialzato dalla gravità, cioè non potrebbe oscillare sull'asse di sospensione. Allora la bilancia chiamasi *trabocchetto*.

Per rendere l'equilibrio stabile il giogo è munito superiormente di una vite con una madrevite mobile (*o*), mediante la quale si può soddisfare alla detta condizione di stabilità, come pure fàr variare la sensibilità della bilancia, come vedremo più innanzi.

3. Condizione per l'esattezza della bilancia. — Una bilancia si dice *giusta* od *esatta*, se *il suo giogo rimane stabilmente orizzontale coll'indice allo zero della graduazione, quando i due piatti sono carichi di pesi eguali.*

Ora perchè tale condizione sia soddisfatta si richiede dapprima che i due bracci della bilancia, cioè le due porzioni del giogo comprese fra gli assi di sospensione del medesimo e dei piatti abbiano eguale lunghezza, egual forma, egual peso, e che i due piatti abbiano pure egual peso, perchè solo a tale condizione i due momenti di rotazione di pesi eguali collocati sui due piatti possono essere eguali.

4. Condizione per la sensibilità della bilancia. — Oltre l'esattezza, una buona bilancia deve avere il pregio della *sensibilità*. Una bilancia si dice *sensibile* quando trabocca per ogni piccola differenza di peso nei due piatti, ovvero quanto maggiore è lo spostamento dell'indice per una data differenza di peso.

La sensibilità di una bilancia è:

1° *Direttamente proporzionale alla lunghezza dei bracci*, perchè un piccolo eccesso di peso tanto più facilmente muove il giogo, quanto più lungo è il braccio su cui agisce.

2° *Inversamente proporzionale al peso del giogo e dei piatti*, perchè più facilmente sono spostati da un piccolo eccesso di peso.

3° *Inversamente proporzionale alla distanza del centro di gravità della bilancia dall'asse di sospensione*, perchè così è minore il braccio di rotazione con cui la forza di gravità applicata in quel punto si oppone agli spostamenti che tendono a produrre le più piccole differenze di peso nei due piatti.

La detta sensibilità è poi evidentemente maggiore se l'attrito del giogo sull'asse di sospensione è minore.

5. Metodo della tara nella misura del peso dei corpi. — Siccome è impossibile costruire bilancie con braccia matematicamente eguali, così, quando si richiede molta esattezza, si ricorre al metodo detto della *tara*, o di Borda, o delle *doppie pesate*.

Si mette il corpo che si vuole pesare su uno dei piatti e sull'altro una *tara*, cioè della migliarola, o della sabbia, finchè si abbia l'equilibrio, ovvero finchè l'indice si arresti ad una data divisione del suo arco. Poi si toglie il corpo dal rispettivo piatto e si mettono al suo posto dei pesi metrici finchè l'indice ritorni alla stessa divisione di prima. Così è evidente che, ancorachè la bilancia sia inesatta, il peso del corpo equivale esattamente alla somma dei pesi metrici che producono lo stesso effetto, perchè agiscono collo stesso braccio di leva.

Tutta la difficoltà consiste nell'avere pesi metrici esatti, i quali si ottengono con procedimenti speciali che si praticano dai fabbricanti di pesi.

Inoltre il metodo della tara somministra anche il *modo di riconoscere se la bilancia è esatta*, perchè togliendo la tara

e rimettendo al suo posto il corpo, mentre sul primo vi è il complesso dei pesi che lo equivalgono, se il giogo tornerà alla posizione primiera si potrà concludere che la bilancia è esatta, mentre nel caso contrario è inesatta.

Infine il metodo esposto somministra il modo di avere due pesi perfettamente eguali.

6. La stadèra è una bilancia a braccia diseguali, costituita da una leva (LA, fig. 68) di primo genere, il cui fulcro consiste in

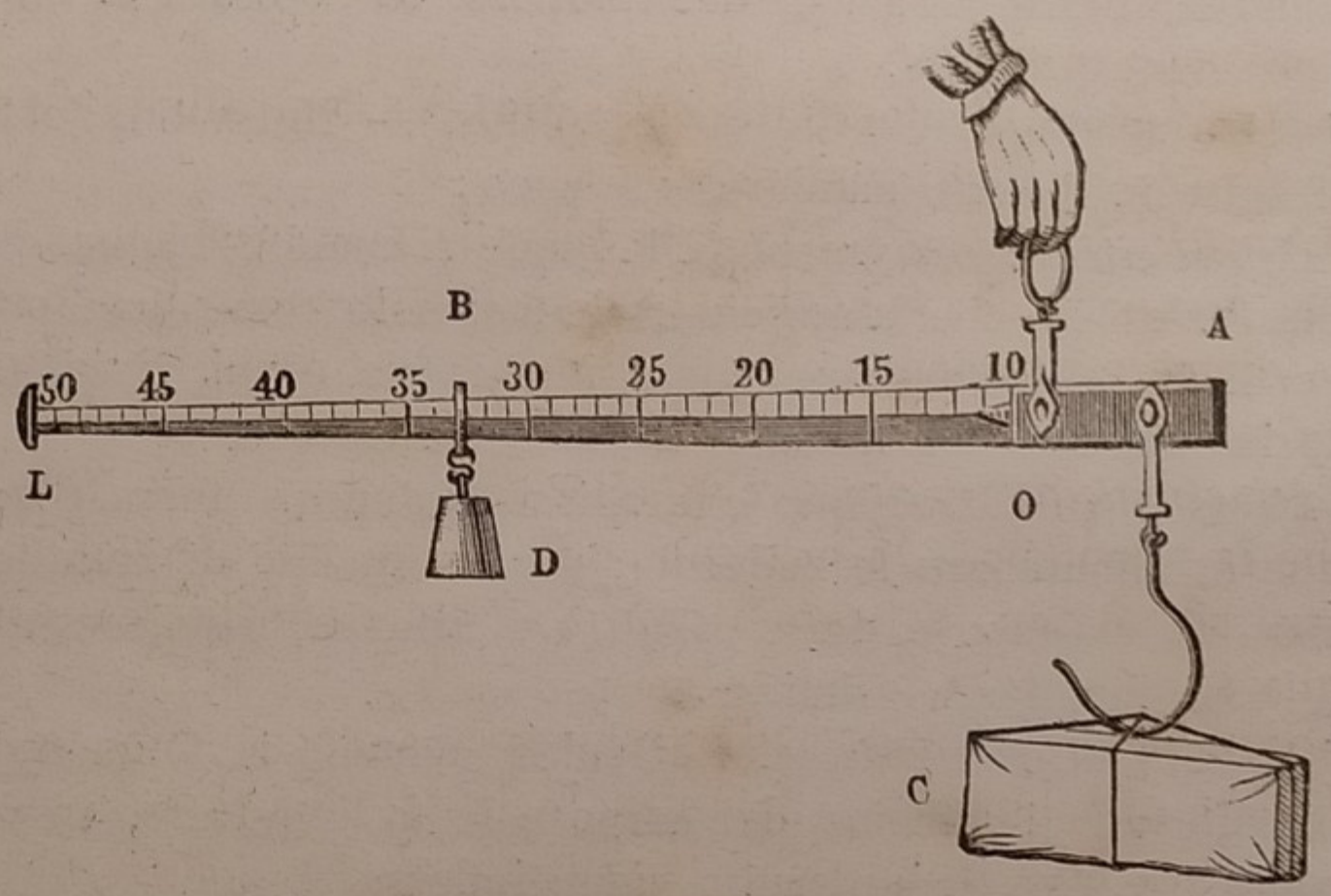


Fig. 68.

un asse di rotazione (O) che attraversa la leva e viene sospeso ad un punto fisso; la resistenza è la merce (C) che si vuole pesare, la quale si colloca in un bacino, o si sospende ad un uncino di cui è munito il braccio più corto, e la potenza è un peso mobile (D), detto *romano* (dal nome arabo *roumain*, che significa pomo di melagrana).

Pel principio della leva, il romano, collocato a diverse distanze dal fulcro, fa equilibrio a pesi diversi collocati nel bacino, o attaccati all'uncino.

7. Graduazione. — Per fare la graduazione si segna ordinariamente 0 nel punto in cui deve essere collocato il romano, affinchè la leva della stadera scarica sia orizzontale, poi si pone nel bacino, o si attacca all'uncino, per esempio 1 *kg.* e si segna 1 nella nuova posizione del romano, ecc.

§ 44. Proprietà meccaniche speciali dei solidi.

1. La elasticità nei solidi. — I corpi solidi posseggono in diverso grado *la proprietà di cangiare forma sotto l'azione di forze esterne e di ripigliare poscia la forma primiera al cessare dell'azione deformatrice.* Tale proprietà chiamasi *elasticità.*

Essa manifestamente dipende dal fatto che le molecole spostate dalla loro posizione di equilibrio ne prendono un'altra in cui le forze molecolari interne fanno equilibrio all'azione deformatrice, e al cessare di questa ripigliano la posizione primiera.

2. Quattro specie di elasticità nei solidi. — Nei solidi l'elasticità si può manifestare in quattro maniere, che sono:

1° L'*elasticità di compressione*, la quale si manifesta quando la forza esercita una pressione che fa avvicinare le molecole, come quando una palla di avorio o di marmo urtando un piano si schiaccia e poi, ripigliando tosto la forma primiera, urta nuovamente il piano e rimbalza.

2° L'*elasticità di trazione,* che agisce quando la forza esercita una trazione che fa allontanare le molecole; per es. un filo di metallo, o altra materia, fisso ad un capo e tirato all'altro, si allunga, e poi cessata la trazione ripiglia la lunghezza primiera.

3° L'*elasticità di flessione*, che si palesa quando la forza agisce perpendicolarmente alla lunghezza del corpo e lo fa inflettere, come quando una verga elastica fissa in un punto viene inflessa.

4° Infine l'*elasticità di torsione* si manifesta quando la forza torce il corpo. Per es, se un filo, od una verga elastica, fissa ad un capo, viene torto all'altro, esso si storce al cessare dell'azione deformatrice.

3. Limite di elasticità. — La proprietà dei corpi di ripigliare la forma primiera al cessare della causa deformante ha un limite, oltrepassato il quale avviene una deformazione permanente, od una separazione delle parti. Quindi si denomina: *limite di elasticità di un corpo la forza minima necessaria a produrre nel medesimo una deformazione permanente.*

4. Proporzionalità della deformazione alla forza deformatrice. — L'esperienza ha provato che entro il limite di elasticità *la grandezza della deformazione prodotta da una forza esterna in un corpo è proporzionale alla forza deformatrice.* Per es., se un filo metallico fissato verticalmente ad un capo si allunga di un millesimo di millimetro per una forza traente di 1 *kg.* applicata all'altro capo, si allunga del doppio per una forza traente doppia, ecc.

Lo stesso avviene nella compressione di un prisma (e di più l'accorciamento di questo per una forza premente è precisamente eguale all'allungamento prodotto dalla medesima forza quando agisce per trazione); cioè se un prisma si accorcia di 1 millesimo di *mm.* sotto una pressione di 1 *kg.*, si accorcia del doppio per una pressione doppia, ecc.

Infine la detta proporzionalità della deformazione alla forza deformatrice sussiste anche per la torsione e la flessione.

5. Isocronismo delle oscillazioni prodotte dalla elasticità. — Se un filo metallico viene fisso al suo capo superiore e teso all'altro capo da un peso portante un indice orizzontale, facendo girare questo orizzontalmente avviene una torsione del filo, al cessare della quale l'elasticità di torsione del medesimo fa oscillare l'indice da una parte e dall'altra della posizione di riposo, e si riconosce che queste oscillazioni hanno tutte la stessa durata, qualunque ne sia l'ampiezza, purchè non sia oltrepassato il limite di elasticità.

Similmente una verga, o lamina, quando viene flessa e poi lasciata libera, eseguisce oscillazioni isocrone.

In generale, quando l'azione deformatrice di un corpo cessa repentinamente, le sue molecole ritornano nella loro posizione primiera con una certa velocità, e per l'inerzia non si arrestano in quella, ma l'oltrepassano e si spostano in senso contrario, e così oscillano. Tale moto oscillatorio che durerebbe eternamente nel corpo se l'attrito e la resistenza del mezzo non lo spegnessero poco a poco è analogo a quello del pendolo, poichè le molecole si trovano nelle medesime condizioni dinamiche di un pendolo che eseguisce oscillazioni di piccola ampiezza. Anzi mentre le oscillazioni di un pendolo sono isocrone solo nel breve limite di 3 o 4 gradi, perchè al di là di questo la forza che lo fa ritornare nella posizione primiera non è più proporzionale allo spostamento, nelle oscillazioni prodotte dalla elasticità, entro il limite di questa, la forza elastica che fa ritornare le molecole nella posizione primiera è in ogni istante proporzionale allo spostamento dalla posizione di riposo. Perciò: *le oscillazioni dovute alla elasticità sono isocrone.*

6. Applicazione dell'isocronismo delle oscillazioni prodotte dalla elasticità di flessione. — Mentre negli orologi a pendolo viene applicato l'isocronismo delle oscillazioni di un pendolo, per regolarne il movimento, negli oriuoli viene applicato l'isocronismo delle oscillazioni prodotte dalla elasticità di flessione. Perciò in essi, oltre la molla principale che viene avvolta attorno ad un asse quando si carica l'orologio e poi svolgendosi mantiene il movimento del meccanismo, vi è una molla secondaria sottilissima, avvolta a spirale, la quale si vede aprendo la cassa dell'oriuolo. Essa ha un capo fisso ad un asse, mentre l'altro capo è unito ad una specie di volano, o volante detto il *bilanciere* (fig. 69), costituito da un anello portato da tre raggi. Dato un impulso al bilanciere, la molla gli fa eseguire oscillazioni isocrone. Per regolare la durata di queste, dipendentemente dalle variazioni della temperatura che ne fanno variare il diametro, negli oriuoli ordinarii vi è il *registro*, col quale la spirale viene stretta in un punto più o meno vicino al suo capo fisso, cosicchè la parte oscillante risulta più o meno lunga, il che fa crescere o diminuire la durata delle sue oscillazioni, come avviene pel pendolo, e così rallenta od accelera il moto delle ruote.

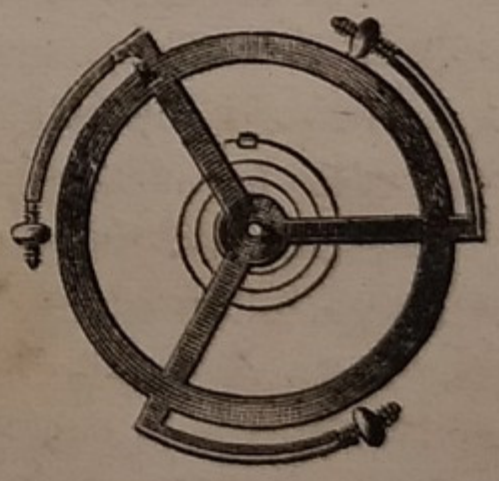


Fig. 69.

Al bilanciere è poi coordinato un congegno detto *scappamento*, che lascia passare solo un dente della ruota primaria ad ogni oscillazione, e nello stesso tempo comunica al medesimo un piccolo impulso che ne conserva il movimento, senza del che esso si arresterebbe per l'attrito e la resistenza dell'aria.

7. Legge della elasticità di trazione e pressione. — Siccome le forze molecolari agiscono precisamente in senso inverso nella pressione e nella trazione, perciò la seguente legge della elasticità di trazione vale pure per quella di pressione: *Per uno stesso corpo l'allungamento od accorciamento, entro il limite di elasticità, è direttamente proporzionale alla forza traente o premente, ed alla lunghezza del corpo, ed in ragione inversa della sua sezione. Per corpi diversi la grandezza della deformazione dipende dalla forza elastica speciale a ciascun corpo.*

8. Modulo di elasticità. — La forza elastica speciale a ciascun corpo si misura mediante la pressione o la trazione necessaria a produrre nel medesimo una data variazione di lunghezza, e si denomina *modulo di elasticità.*

Il *modulo di elasticità di trazione* si definisce: *il peso che sarebbe necessario per raddoppiare la lunghezza di un filo di* 1 mm.^{2} *di sezione se ciò fosse possibile senza strapparlo.*

9. Elasticità susseguente. — I fatti esposti riguardo all'elasticità si verificano solo quando le azioni deformatrici non hanno lunga durata; ma se esse agiscono lungo tempo, si osserva che alla prima deformazione ne succede un'altra sempre minore, ma continua, la quale può durare per settimane e mesi. Inversamente al cessare dell'azione della forza, scompare solo la primitiva deformazione, mentre quella susseguente scompare solo a poco a poco, e il corpo per riprendere esattamente la forma primiera ha bisogno di un tempo eguale a quello durante il quale fu sottoposto alla deformazione.

Siffatte deformazioni lente che succedono a quelle repentine sono dovute ad una elasticità detta di *seconda specie*, o *elasticità susseguente*. Su questi fenomeni esercita molta influenza la temperatura.

Per l'elasticità susseguente le molle tese alla lunga si stancano, le travi si piegano, i materiali degli edifici cedono.

Perciò nel determinare *il limite di elasticità di un corpo*, cioè la forza minima necessaria per produrre in esso una deformazione permanente, la elasticità susseguente dà luogo a gravi incertezze, per evitare le quali si è convenuto di misurare quel limite col peso minimo che tendendo per 1 ora un filo di 1 *mm.*^{2} di sezione vi provoca un allungamento di 0,5 *mm.* per ogni metro di lunghezza.

10. La tenacità. — Con tal nome si indica la resistenza che un corpo oppone alla separazione delle sue parti. — Essa si misura col peso minimo che spezza un filo di lunghezza qualunque e 1 *mm.*^{2} di sezione, il quale peso si chiama *coefficiente di rottura.*

Ma anche la tenacità dipende dalla durata dell'azione che la cimenta, e di questa durata bisogna tener conto nelle costruzioni, come pure devesi tenere conto degli urti a cui può essere sottoposto il materiale impiegato.

Per es., nel caso di un ponte, non si deve calcolare la resistenza per lo stato di quiete dei pesi che essi debbono reggere, ma per lo stato di moto, perchè in tale caso si determinano delle oscillazioni, e la deformazione riesce maggiore di quella bastevole ad equilibrare il carico in quiete.

11. Plasticità. — Un corpo si dice *plastico* quando può subire notevoli variazioni permanenti di forma senza andare in pezzi. Tali sono l'argilla umida, la pasta, il piombo, ecc.

12. Duttilità. — Chiamansi *duttili: i corpi che mediante una forza di trazione si lasciano distendere in fili senza perdere la coesione;* tali sono il caucciù, il vetro fuso, la pece molle, i fasci di fibre organiche, e molti metalli, come il platino, l'oro, l'argento, il ferro, il rame, ecc., i quali si lasciano ridurre in fili sempre più sottili mediante la filiera, che è una lastra di acciaio munita di più fori di diametro decrescente.

Per mezzo di un procedimento inventato dall'inglese Wollaston si ottengono fili di platino del diametro di $^1/_{1400}$ di millimetro, e quindi assai più sottili dei capelli più fini. Per ciò si prepara una forma colla terra dei fonditori, come per gittare una verga di argento, poi nell'asse della cavità cilindrica si tende un filo già assai sottile, di platino, quale si può ottenere dalla filiera, e si versa nella forma l'argento fuso. Così risulta un filo d'argento coll'asse di platino. Facendo poi passare questo filo bimetallico alla trafila e riducendolo sottile quanto si può, i due metalli si assottigliano ad un tempo. Il filo ottenuto viene indi posto nell'acqua forte od acido nitrico bollente, in cui l'argento si scioglie ma non il platino, e si ottiene così un filo di platino sottilissimo e quasi invisibile. Tali fili servono agli astronomi nei loro telescopii per fissare con precisione il posto delle stelle.

13. Malleabilità. — *La malleabilità è la proprietà dei corpi di lasciarsi ridurre in lamine più o meno sottili*, mediante il laminatoio, od il martellamento.

Presentano questa proprietà specialmente i metalli, come l'oro, il platino, l'argento, il rame, il ferro, lo stagno, il piombo, ecc.

Il laminatoio consiste in due cilindri girevoli in senso contrario, i quali si possono più o meno avvicinare. Facendo passare il metallo tra tali cilindri sempre più avvicinati, esso si distende e si assottiglia sempre più.

Ma per ottenere quei fogli sottilissimi di oro e di argento che servono ad indorare ed inargentare, il battiloro adopera il martello. Egli taglia a quadratelli le lastre d'oro, già ben sottili che vengono dai laminatoi, e dispone ciascun quadratello tra due fogli di buccio, che è una sottile pellicola di budello di bue. Riunisce un certo numero di fogli metallici l'uno sopra l'altro in forma di libro, e poi li batte su un ceppo di marmo con martelli di varie sorta, nel qual modo l'oro non riceve i colpi direttamente ma per l'intermezzo delle pellicine, e si assottiglia senza rompersi. Così si ottengono fogli d'oro di tale sottigliezza che 70000 l'uno sull'altro fanno appena lo spessore di 1 millimetro.

La malleabilità e la duttilità dei metalli dimostrano che le loro molecole, sotto l'azione di esterne pressioni, possono scorrere le une sulle altre senza che venga distrutta la loro coesione.

14. Durezza. — Con tal nome si distingue: *la resistenza che un corpo oppone allo spostamento delle sue molecole.*

Tale proprietà si determina in mineralogia, cercando quale è il corpo che scalfisce un altro senza lasciarsi scalfire da questo. Quindi si è costrutta la seguente tabella, detta di Mohs, nella quale ciascun corpo è rigato da quelli che seguono e non da quelli che precedono:

1 Talco,
2 Gesso,
3 Spato fluore,
4 Spato calcare,
5 Apatite,
6 Felspato,
7 Quarzo,
8 Topazio,
9 Corindone,
10 Diamante.

I corpi più duri sono l'iridio, il diamante, il silicio, il boro, cristallizzati.

I metalli puri sono poco duri, ma acquistano maggior durezza in lega con altri metalli o con carbone. Perciò le monete, e in generale gli oggetti d'oro e d'argento, si fanno con leghe di codesti metalli e rame.

La durezza non deve essere confusa colla tenacità, cioè colla resistenza alla separazione delle parti del corpo intero. Il cuoio ha grande tenacità, ma poca durezza.

Un'importante applicazione della durezza è quella che si fa colle polveri che servono a pulire, come lo smeriglio, la pomice, il tripoli.

15. Fragilità. — Chiamansi *fragili* i corpi che si spezzano facilmente per un debole cangiamento di forma. Questa proprietà si incontra in massimo grado nel vetro rapidamente raffreddato, come le così dette *lagrime bataviche* e i *fiaschi* di Bologna, costituiti da vetro rapidamente raffreddato. La rottura della punta riduce quelle in polvere. I fiaschi di Bologna si riducono in pezzi per una piccolissima scalfittura prodotta da un granello di sabbia che vi si lascia cadere.

Metalli fragili sono il bismuto e lo zinco caldo, i quali si riducono facilmente in polvere mediante urti.

La fragilità del vetro viene notevolmente diminuita quando esso viene riscaldato fino al principio della rovenza, e poi viene immerso in un bagno di olio o grasso, o resina, a 300°, ovvero viene sottoposto a grande pressione. Costituisce allora il *vetro temprato* e *non fragile.*

Un corpo più duro di un altro può essere più fragile. Così il vetro e il diamante più duri del legno sono più fragili di questo.

Rimarchevole è la grande influenza della minima quantità di carbonio sulla fragilità delle diverse sorta di ferro. La ghisa, che è ferro con circa 5 per 100 di carbonio, è dura e fragile; il ferro da fucina, che è ferro contenente circa 1 per 100 di carbonio, è tenero, duttile e malleabile; l'acciaio, che contiene circa 2 per 100 di carbonio, è assai duro ed elastico.

16. Vischiosità. — Si dicono *vischiosi* i corpi solidi i quali sebbene fragili sotto l'azione di forze repentine si dimostrano plastici per l'azione prolungata di forze anche deboli. Così mentre un bastone di ceralacca si rompe facilmente, appoggiato ai suoi due capi alla lunga si incurva per l'azione del proprio peso, e i pezzi di pece nei tini alla lunga si saldano e colano dalle fenditure.

17. La tempera, l'incrudimento, il ricuocimento. — Un'operazione che modifica assai l'elasticità, la malleabilità e duttilità, la durezza e la fragilità dei corpi, è la *tempera* che consiste nello scaldare un corpo fortemente e poi prontamente raffreddarlo, sia tuffandolo in un liquido freddo, come l'acqua semplice o l'acqua saponata, l'olio, il sego, sia esponendolo ad una corrente di aria fredda. L'acciaio colla tempera acquista una grandissima elasticità e durezza; ma se la tempera è troppo forte, o, come dicono, cruda, diviene fragile. I pratici regolano la tempera dell'acciaio secondo il fine cui esso è destinato, giovandosi dei vari colori che piglia ai vari gradi di calore. Gli oggetti di vetro raffreddati celeremente divengono fragili. Per ciò impedire, appena soffiati si pongono in un forno che li lascia raffreddare a poco a poco. Tutti gli strumenti che debbono essere duri, come le lime, i coltelli, si fanno di acciaio temprato.

L'elasticità, come anche la durezza, viene aumentata dall'incrudimento, cioè dal ravvicinamento delle molecole operato a freddo per mezzo del laminatoio, della filiera e del martello.

Al contrario l'elasticità è diminuita dal *ricuocimento* che consiste nel portare il corpo a temperatura meno elevata che per la tempera e nel lasciarlo poscia raffreddare lentamente. Mediante il ricuocimento si dà alle molle il grado di elasticità conveniente.

Capitolo III.

MECCANICA SPECIALE DEI LIQUIDI

§ 45. Coesione, compressibilità ed elasticità dei liquidi.

1. Debole coesione dei liquidi. — Si è già notato (pag. 7) essere carattere dei liquidi: *la mobilità delle loro molecole, le quali scorrono facilmente le une sulle altre*, come si vede nello scorrere in basso, sul suolo inclinato, di tutte le acque terrestri, e nell'espandersi che fa un liquido versato su di un piano orizzontale.

Tuttavia *se la coesione nei liquidi è debole non è però trascurabile.* Il che è dimostrato dalla proprietà che essi hanno di ridursi in goccie quando si trovano in piccola massa, come si osserva nell'acqua proiettata in piccole quantità su pavimento polveroso, o su lastre di vetro, di maiolica, di metallo, coperte di nero fumo; nel mercurio sul vetro, sul legno, ecc. Codesta forma sferica attesta l'esistenza di attrazioni molecolari la cui risultante è diretta verso il centro.

Di più, se si avvicinano fino a contatto due goccioline di mercurio, o due goccioline d'acqua collocate su di una lastra di vetro, o di maiolica, ricoperta di nero fumo, si veggono agglomerarsi in un'unica goccia per la coesione.

Infine, si può osservare che, senza la coesione, le molecole inferiori delle goccie sospese alle foglie dovrebbero distaccarsi

dalle superiori. Anzi tale osservazione dimostra ancora che la coesione nei liquidi è più intensa che la gravità

2. Esperienza di Plateau. — È interessante, specialmente a tale proposito delle goccie liquide, l'esperienza di Plateau. Se in una miscela di alcool ed acqua, avente lo stesso peso specifico dell'olio, s'introduce, mediante una pipetta, una piccola quantità di codesto liquido, si vede che esso si riduce in una goccia sferica, perchè il suo peso è sostenuto dalla pressione del liquido circostante (siccome vedremo nello studio del *principio d'Archimede*), e perciò le sue molecole obbediscono liberamente all'azione della coesione.

3. Viscosità dei liquidi. — Per effetto della coesione e dell'attrito interno le molecole dei liquidi incontrano una certa resistenza nello scorrere le une sulle altre, la quale dicesi *viscosità*. Essa è minima nell'etere, nell'alcool, negli olii essenziali e minerali, nel solfuro di carbonio, nell'acqua; è massima negli olii grassi, nella glicerina, nell'acido solforico, nei sciroppi ecc.

Anzi, siccome la natura non procede a salti ma per gradi, così anche per questa proprietà della viscosità non vi è una distinzione netta fra lo stato liquido e lo stato solido.

Infatti, la trementina e il miele presentano uno stato intermedio, mentre la pece, la ceralacca, i balsami, la cera, sono corpi solidi alla temperatura ordinaria, che hanno una grande viscosità.

4. Preparazione della migliarola. — Un'applicazione della proprietà dei liquidi di raccogliersi in goccie sferiche si fa nella preparazione della migliarola di piombo. Il metallo fuso viene lasciato gocciolare da un crivello da un'altezza di circa 60 metri; ciascuna goccia cadendo nell'acqua si rappiglia in un globetto solido.

5. L'idrostatica e l'idrodinamica. — Per la grande mobilità delle particelle dei liquidi la gravità prescrive al movimento ed all'equilibrio dei medesimi leggi speciali. La dottrina dell'equilibrio dei liquidi dicesi *idrostatica;* quella del moto, *idrodinamica*. Questa, applicata allo studio del movimento delle acque nei fiumi e nei canali, chiamasi *idraulica*.

6. Debole compressibilità e perfetta elasticità dei liquidi. — Mentre i gas sono molto compressibili e i solidi lo sono in

diverso grado (pag. 8), i liquidi sono pochissimo compressibili, cioè diminuiscono pochissimo di volume per l'azione di pressioni esterne, e la compressibilità varia da un liquido all'altro. Così il volume dell'acqua, a 0°, diminuisce solo di 51 milionesimi, per un aumento di pressione di 1 *kg.* per *cm.* quadrato.

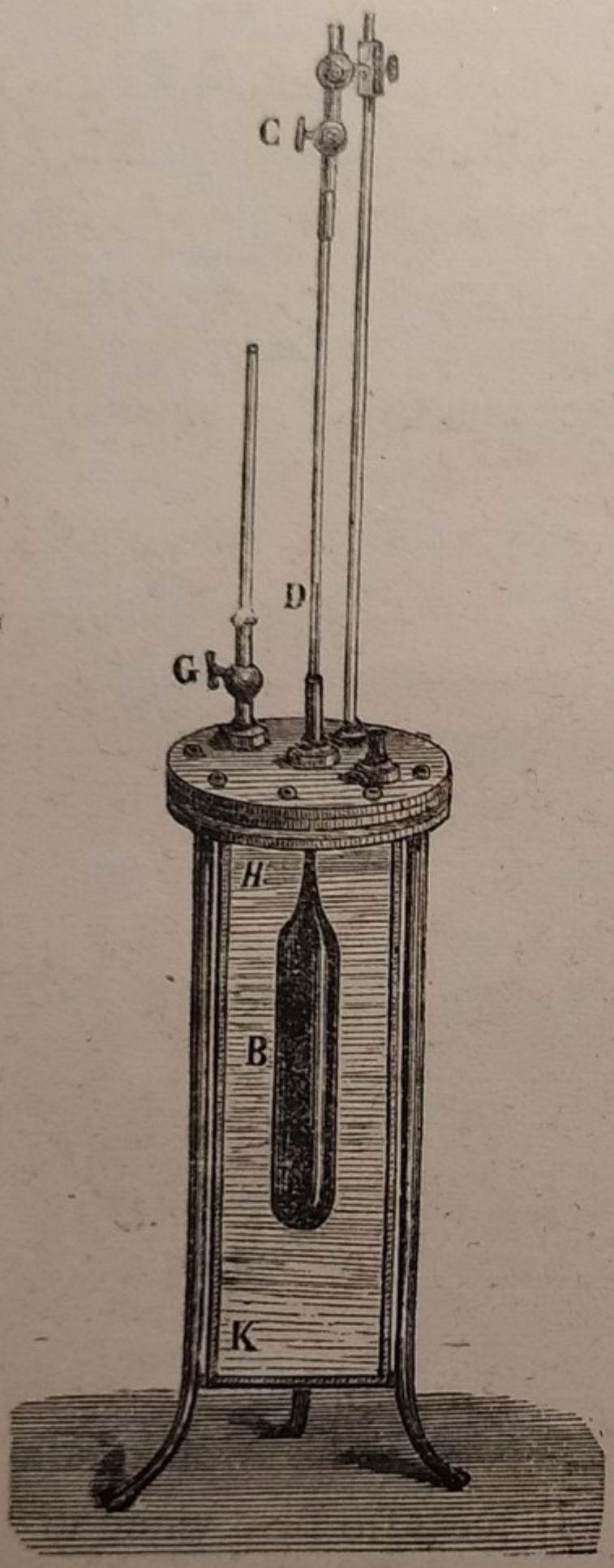


Fig. 70.

Tale compressibilità è maggiore di quella del mercurio, minore di quella dell'alcool e dell'etere, e varia colla temperatura.

Ciò risulta dalle esperienze fatte con un apparecchio detto *piezometro*.

Infine i liquidi ripigliano esattamente il volume primiero al cessare della pressione, cioè *sono perfettamente elastici*.

7. Piezometro. — Esso consta di una ampolla di vetro (B, fig. 70) saldata ad un cannello stretto e ben cilindrico (D), munito all'estremità di una chiavetta (C), e contenuta in un recipiente metallico chiuso (H K), pieno di acqua e comunicante con un tubo laterale aperto (G), di diametro eguale a quello del collo (D) dell'ampolla.

Se si riempie questa e una parte del suo collo del liquido che si vuole comprimere, e si esercita sul medesimo una pressione, mettendo in comunicazione l'estremità aperta (C) di quello con una pompa di compressione, si vede il liquido abbassarsi nel collo (D), mentre si solleva nel cannello laterale (G), perchè la bolla (B) aumenta di volume. Ora se il liquido fosse incompressibile i due spostamenti nei due cannelli dovrebbero essere eguali; invece si osserva che quello del collo (D) è maggiore dell'altro (in G), e la differenza indica la diminuzione di volume del liquido compresso, la quale si verifica essere *proporzionale alla pressione.*

Al cessare della pressione il liquido ritorna all'altezza primiera nei cannelli D e G dell'apparecchio; il che prova che i *liquidi sono perfettamente elastici.*

§ 46. Il principio di Pascal e il torchio idraulico.

1. Trasmissione della pressione in tutti i sensi nei liquidi. — Se col pugno si esercita una pressione su un sacco di farina o di cenere si vede la tela rigonfiarsi lateralmente e dal basso in alto, evidentemente perchè la pressione si trasmette in tutte le direzioni. Il fenomeno deve manifestamente avvenire in un modo più perfetto nei liquidi, costituiti da molecole più scorrevoli che non le particelle delle dette sostanze polverose, e lo si può già osservare comprimendo una vescica piena d'acqua ed ermeticamente chiusa.

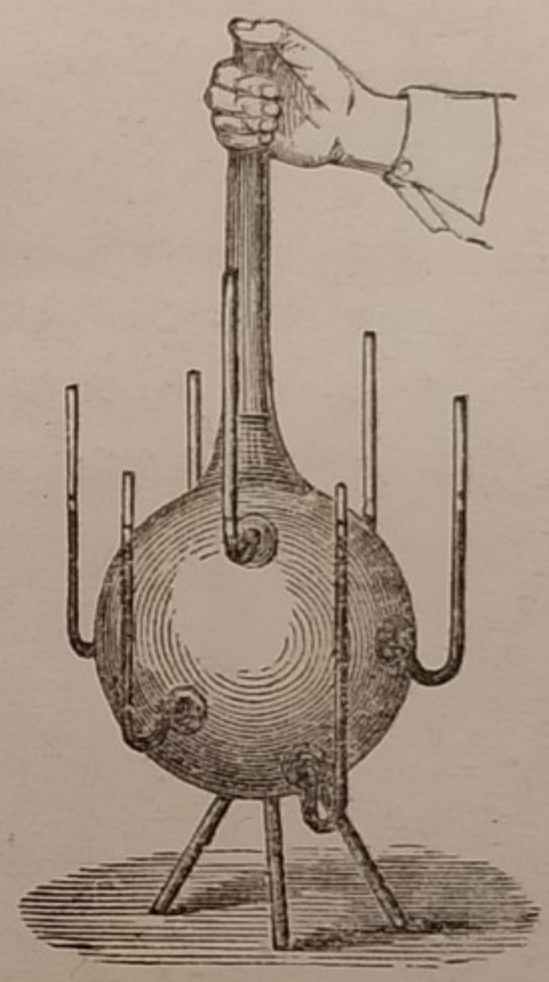


Fig. 71.

Lo stesso fatto si dimostra nelle scuole mediante una sfera cava (fig. 71) munita di una tubulatura principale e di piccoli tubicini piegati ad U, applicati a diversi fori praticati nella sua parete. Si riempie di acqua colorata la sfera, il tubo grande e i tubicini di vetro, fino ad una certa altezza. Allora basta premere alquanto l'aria contenuta nel tubo grande sopra la superficie dell'acqua mediante uno stantuffo, o anche solo mediante il pollice, per vedere il liquido sollevarsi contemporaneamente in tutti i cannelli di vetro.

Un'altra prova sperimentale di questo fatto si può anche dare mel modo indicato dal prof. Pisati, che consiste nel mettere nel piezometro una miscela di acqua e alcool, nella quale sta sospesa una grossa goccia d'olio; premendo quindi il liquido dall'esterno si vede che quella goccia conserva la sua forma sferica, il che non potrebbe avvenire se la pressione non agisse egualmente in ogni senso sulla superficie della medesima.

2. Proporzionalità delle pressioni alle superfici. — Quando si tura una bottiglia, se il tappo tocca il liquido, essa si rompe, perchè se, per es., col tappo si esercita una pressione di 10 *kg*. su 1 *cm*. quadrato del liquido, tale pressione si trasmette egualmente in tutte le direzioni, per modochè ogni *cm*. quadrato, sia nell'interno

della bottiglia, sia alla superficie interna di questa, viene a provare quelle pressione di 10 *kg.*, che supera la resistenza della parete.

3. Principio di Pascal. — Considerando i liquidi come perfettamente fluidi, cioè facendo astrazione dalla debole coesione delle loro molecole, Pascal enunciò pel primo la seguente proposizione, che denominasi *principio di Pascal: Le pressioni esercitate esternamente sulla superficie dei liquidi si trasmettono egualmente in tutte le direzioni, e proporzionatamente al rapporto che vi è tra la superficie su cui si esercita la pressione e quella a cui questa si trasmette.*

4. Espressione algebrica del principio di Pascal. — Rappresentando

con s la superficie premuta da una forza esterna,
» S la superficie nell'interno del liquido o sulla parete, alla quale viene trasmessa la pressione,
» p la pressione sulla superficie s,
» P la pressione sulla superficie S,

si ha
$$\frac{p}{P} = \frac{s}{S},$$

d'onde
$$P = p\,\frac{S}{s}.$$

Per es., se $S = 100\ s$, si ha:

$$P = p\,\frac{100\,s}{s} = 100\ p.$$

5. Il torchio o strettoio idraulico, ideato da Pascal, ma reso veramente pratico dall'ingegnere inglese Bramah, nel 1796, è un apparecchio col quale si esercita pressione mediante l'acqua. Esso è fondato sul principio della trasmissione delle pressioni nei liquidi proporzionatamente alla superficie.

È costituito (fig. 72) da una pompa idraulica (A D) aspirante e premente, la quale comunica mediante un tubo metallico (FF) con un cilindro cavo (C) di maggior diametro, in cui trovasi uno stantuffo che porta superiormente una tavola (T), scorrevole fra 4 colonne, le quali sostengono una seconda tavola. Tra le due tavole si colloca l'oggetto che si vuole comprimere.

Quando lo stantuffo della pompa (A) viene sollevato mediante una leva (L) di 2° genere l'acqua del serbatoio (A) apre una valvola ed entra nel cilindro della pompa sotto lo stantuffo; indi, coll'abbassamento di questo, la detta valvola si chiude, e se ne apre un'altra laterale, per modochè l'acqua (pel tubo F F) entra nel cilindro maggiore (C), ed ivi spinge lo stantuffo con intensità proporzionale al rapporto delle aree dei due stantuffi. Siccome poi l'acqua spinta dalla pompa aspirante e premente nel grande cilindro non può più ritornare indietro in grazia di una valvola la quale si chiude non appena il piccolo stantuffo si solleva, così il grande stantuffo a poco a poco si innalza.

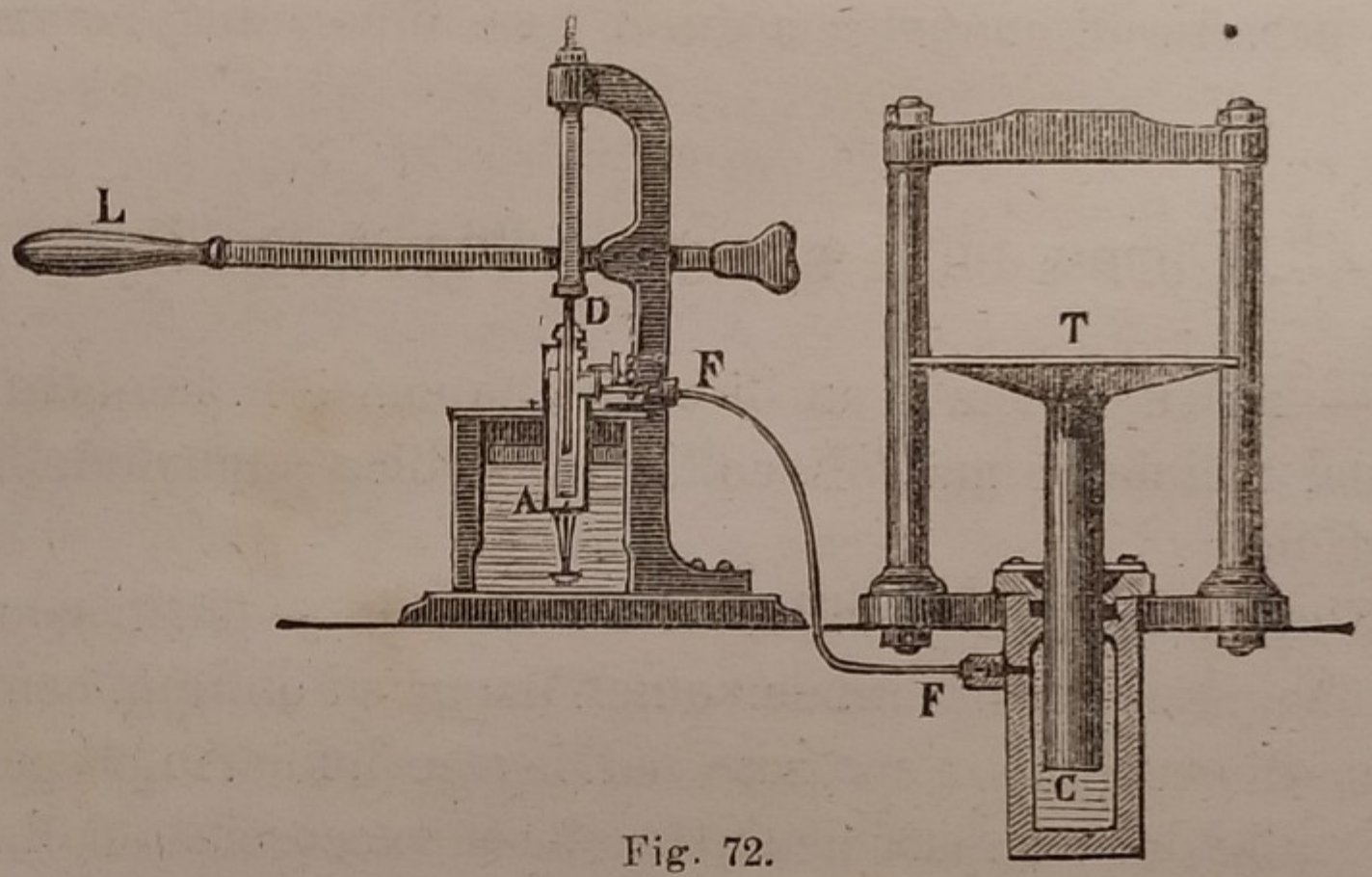


Fig. 72.

Se, per es., lo stantuffo grande ha un'area 100 volte maggiore di quella dello stantuffo piccolo, una pressione di 1 *kg.* esercitata da questo sull'acqua spinge in su lo stantuffo grande con una pressione di 100 *kg.*

Un uomo può facilmente esercitare sulla leva una pressione di 25 *kg.*; perciò, supposto il suo braccio di leva decuplo di quello della resistenza, mediante quella esercita sullo stantuffo piccolo una pressione $25 \times 10 = 250$ *kg*, e quindi sullo stantuffo grande una pressione $250 \times 100 = 25000$ *kg*. Con disposizioni speciali si possono esercitare pressioni ancora maggiori.

Ma anche qui verificasi l'aurea regola della meccanica (pagina 126) di cui si è parlato a proposito delle macchine in generale, cioè: *gli spazi percorsi dai due stantuffi sono in ragione inversa delle pressioni sui medesimi.*

6. Usi. — Il torchio idraulico si adopera per comprimere le balle di cotone, per estrarre il succo delle barbabietole, l'olio dai semi oleosi, per lisciare la carta e le stoffe mediante pressione, per mettere alla prova la resistenza dei canapi, delle catene, delle piastre, e specialmente dei cannoni, delle caldaie delle macchine a vapore, premendo l'acqua nelle medesime, per curvare le lastre delle navi corazzate, per comprimere l'aria, ecc.

Infine il torchio idraulico viene perfino usato dagli ingegneri per sollevare grandissimi pesi. Per es., quando venne restaurata la cattedrale di Strasburgo, quattro potenti torchi idraulici sollevarono e sostennero in aria la gigantesca aguglia del tempio, ciò che permise di compiere sotto di essa importanti lavori.

§ 47. Forma della superficie libera dei liquidi.

1. — La superficie di un liquido che non è in contatto delle pareti del recipiente ma solo coll'aria si dice **superficie libera del liquido.**

2. Forma della superficie di un liquido. — Tutti sanno che un bastone parzialmente immerso nell'acqua ed obliquamente alla superficie di essa appare spezzato, ed invece immerso perpendicolarmente alla detta superficie appare bensì raccorciato nella parte immersa, ma non spezzato. Ciò dipende, come insegna l'*ottica*, dalla *rifrazione della luce*, cioè dal fatto che quando i raggi luminosi, che partono dai punti del bastone immersi nell'acqua, passano obliquamente dall'acqua nell'aria, mutano direzione e l'occhio li riceve come se provenissero da punti più elevati di quelli da cui partono realmente.

Ora se si immerge nell'acqua tranquilla di un recipiente un filo a piombo, si vede che la parte del filo immersa nel liquido appare in linea retta con quella emersa; invece se si tiene il filo in modo che sia obliquo alle superficie dell'acqua allora esso appare spezzato come il bastone.

Lo stesso avviene con gli altri liquidi.

Dalle precedenti osservazioni si deve concludere che la *superficie libera di un liquido, le cui molecole sono sotto la sola azione della gravità, è in ciascun punto perpendicolare alla direzione di questa forza, cioè orizzontale.*

Se un colpo di vento produce qualche sollevamento nella superficie dell'acqua, esso non dura, ma la massa liquida sollevata discende, finchè la sua superficie sia di nuovo orizzontale, cioè perpendicolare alla gravità.

Ma se, *oltre alla gravità, agisce sulle molecole liquide un'altra forza in direzione differente da quella*, per es., la forza centrifuga (§ 32), che si sviluppa comunicando un moto di rotazione al recipiente che contiene un liquido (fig. 73), allora si vede la sua superficie libera inclinarsi tanto più, quanto maggiore è la velocità rotatoria, perchè allora, oltre la gravità verticale (mg), agisce sulle molecole la forza centrifuga orizzontale (mc), e la risultante (mr) delle due forze è inclinata verso la parete, tanto più quanto maggiore è la componente orizzontale, cioè la forza centrifuga.

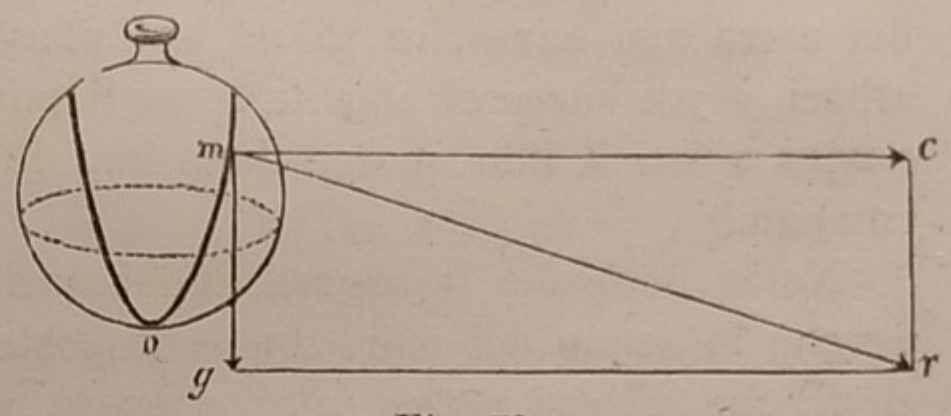


Fig. 73.

In generale quando la risultante delle forze che agiscono sulle molecole liquide non è verticale, ma inclinata, la superficie di un liquido cessa di essere orizzontale ma si inclina in modo da disporsi perpendicolarmente alla detta risultante.

Quindi si deve concludere che: *la superficie libera di un liquido si dispone sempre perpendicolarmente alla risultante delle forze che agiscono sulle sue molecole.*

3. Dimostrazione della precedente legge. — L'enunciata proposizione generale relativa alla disposizione della superficie libera di un liquido si può dimostrare mediante la teoria del piano inclinato osservando che se la superficie di un liquido ha la direzione PQ (fig. 74) obliqua a quella della risultante Mp delle forze che agiscono sulla molecola M, detta risultante produce l'effetto delle sue due componenti: Mg parallela alla superficie del liquido e Mq perpendicolare a tale superficie. Questa seconda componente è equilibrata dalla resistenza del liquido, ma la componente Mg fa scorrere la molecola M sulla superficie del medesimo, e ciò avviene sempre quando la componente parallela non è nulla, cioè la superficie non è perpendicolare alla direzione della risultante.

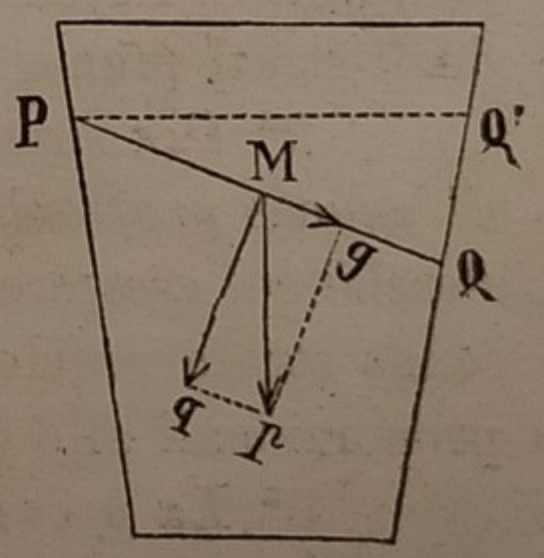


Fig. 74.

4. Forma della superficie dei mari. — Ora, se la superficie di livello di un liquido in riposo entro un recipiente deve essere perpendicolare alla gravità, siccome le direzioni di codesta forza s'incontrano nel centro della terra, consegue che quella superficie non è veramente piana, ma curva, dovendo essere perpendicolare a rette che concorrono in un punto, come i raggi di una sfera. Se il recipiente è poco esteso, allora, per la debole curvatura della superficie terrestre, quella del livello del liquido si confonde sensibilmente con una superficie piana. Ma se il liquido ha grande estensione, come avviene nei laghi e nei mari, allora la curvatura della sua superficie è sensibilissima. È questa la causa per cui chi osserva dal lido del mare una nave che gli si avvicina scorge dapprima le punte degli alberi, e poi successivamente le parti più basse della nave, e chi sul mare naviga verso il lido scorge dapprima le vette dei monti e le punte dei campanili.

Notisi però che la superficie dei mari non è perfettamente sferica, anche perchè le acque dei mari sono sottoposte a periodici sollevamenti e depressioni, che diconsi *maree* (*alta e bassa marea*), causate dall'attrazione del sole e sovratutto della luna.

§ 48. Pressioni verticali dall'alto in basso dovute alla gravità nei liquidi.

1. Pressioni degli strati superiori dei liquidi su quelli inferiori. — Ogni liquido in riposo in un recipiente si può considerare costituito da una serie di strati compresi fra piani orizzontali equidistanti. Per effetto del peso gli strati superiori premono gli inferiori verticalmente dall'alto in basso, e tali pressioni agiscono secondo le seguenti leggi:

1ª *La pressione sopra ogni strato è proporzionale alla profondità.* Perchè col crescere della profondità cresce il numero degli strati prementi.

2ª *Per liquidi diversi la pressione sopportata da strati di eguale profondità è proporzionale alla densità del liquido.* Perchè col crescere della densità del liquido cresce il peso di ciascuno strato premente, essendo i pesi di corpi di egual volume proporzionali alle densità.

3ª *La pressione è uguale in tutti i punti di un medesimo strato orizzontale.* Questa legge è una conseguenza della prima, perchè tutti i punti di un medesimo strato orizzontale si trovano ad eguale profondità.

2. Pressioni dei liquidi sul fondo dei recipienti. — I liquidi col loro peso debbono evidentemente premere il fondo dei recipienti che li contengono. Tale pressione deve evidentemente dipendere dalla grandezza della base del recipiente e dall'altezza del liquido. Ma colla stessa base e colla stessa altezza di liquido i recipienti possono avere assai diversa capacità, secondochè andando in alto le loro pareti si avvicinano come in una bottiglia, o si allontanano come in un bicchiere conico, o conservano costante la loro distanza, come in un bicchiere cilindrico. Ora qui si verifica un fatto curioso, ed è che: *la pressione sul fondo di un recipiente contenente un liquido dipende solo dalla grandezza della base, dall'altezza del liquido e dalla sua densità, ma non dalla forma del recipiente.*

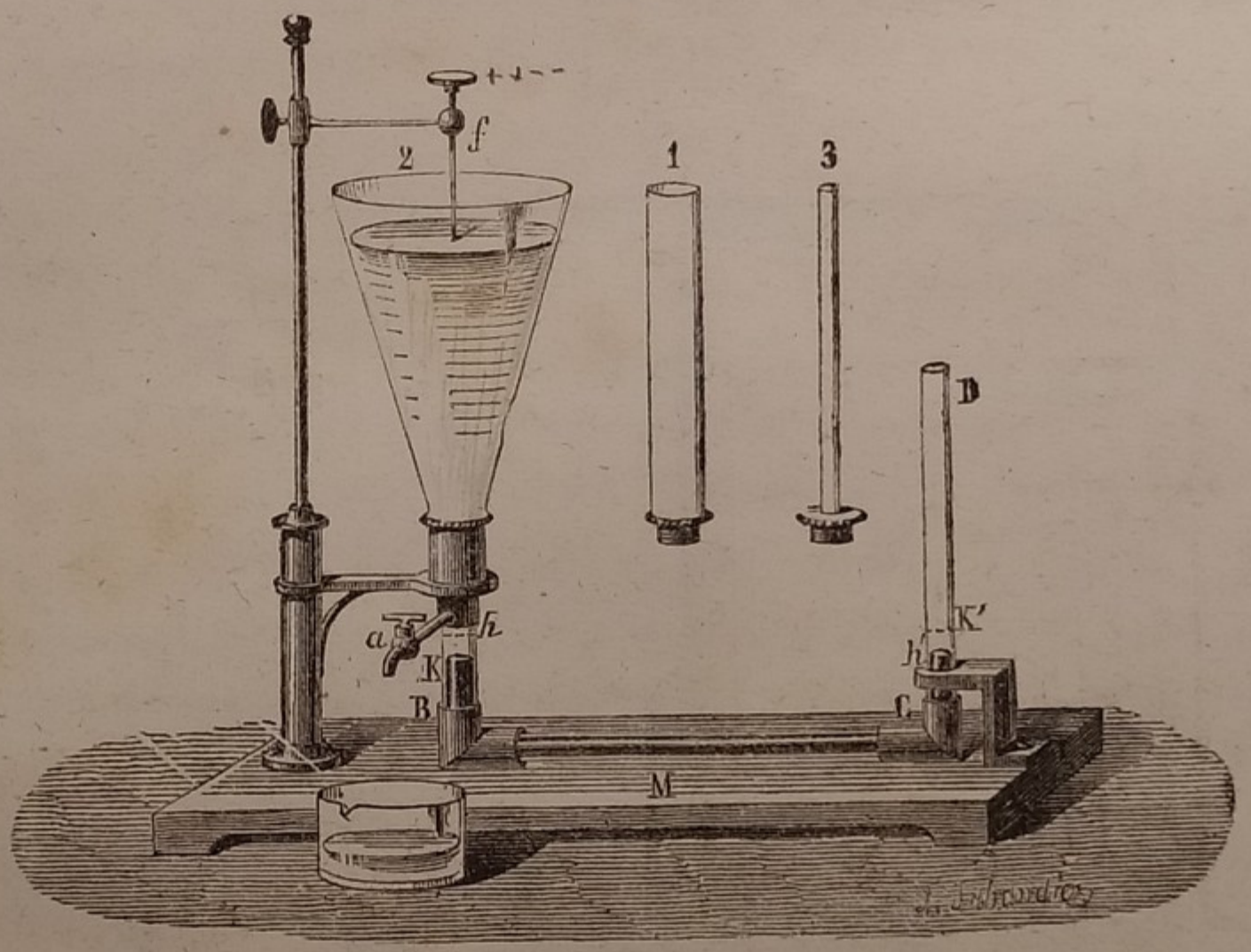


Fig. 75.

3. 1ª Prova sperimentale. — Si può dimostrare codesta proposizione sperimentalmente con l'apparecchio detto di *Haldat*, costituito (fig. 75) da un tubo di vetro (*h* B C D) piegato ad U, e munito ad una estremità (*h*) di una cerchiatura metallica alla quale si possono applicare a vite tre vasi (1, 2, 3) di forma e capacità differente, cioè l'uno cilindrico (1), l'altro (2) che si allarga, ed il terzo (3) che si stringe. Si versa nel tubo ad U mercurio, finchè si sollevi nei due rami all'altezza della chiavetta (*a*) di cui è munita la cerchiatura (*h*); quindi, avvitato uno dei

vasi, per esempio, quello cilindrico (1) alla cerchiatura (h), lo si riempie d'acqua e se ne segna il livello mediante un'asticella (f). L'acqua versata sul mercurio di questo ramo fa sollevare il liquido nell'altro ramo (D) ad una altezza (K′) che si nota per mezzo di un piccolo anello scorrevole nel tubo. Ciò fatto, si apre la chiavetta (a) e si lascia effluire il liquido del vaso (1); quindi lo si svita e si pone in suo luogo il vaso (2) di maggior capacità, perchè si allarga in alto, e lo si riempie d'acqua finchè la superficie della medesima venga a contatto colla punta dell'asticella (f). Si osserva allora che il mercurio si solleva nuovamente nell'altro ramo (D) all'altezza indicata dall'anello. Lo stesso infine avviene se si versa il liquido nel terzo vaso (3) che si stringe, ovvero in un vaso inclinato e comunque ricurvo.

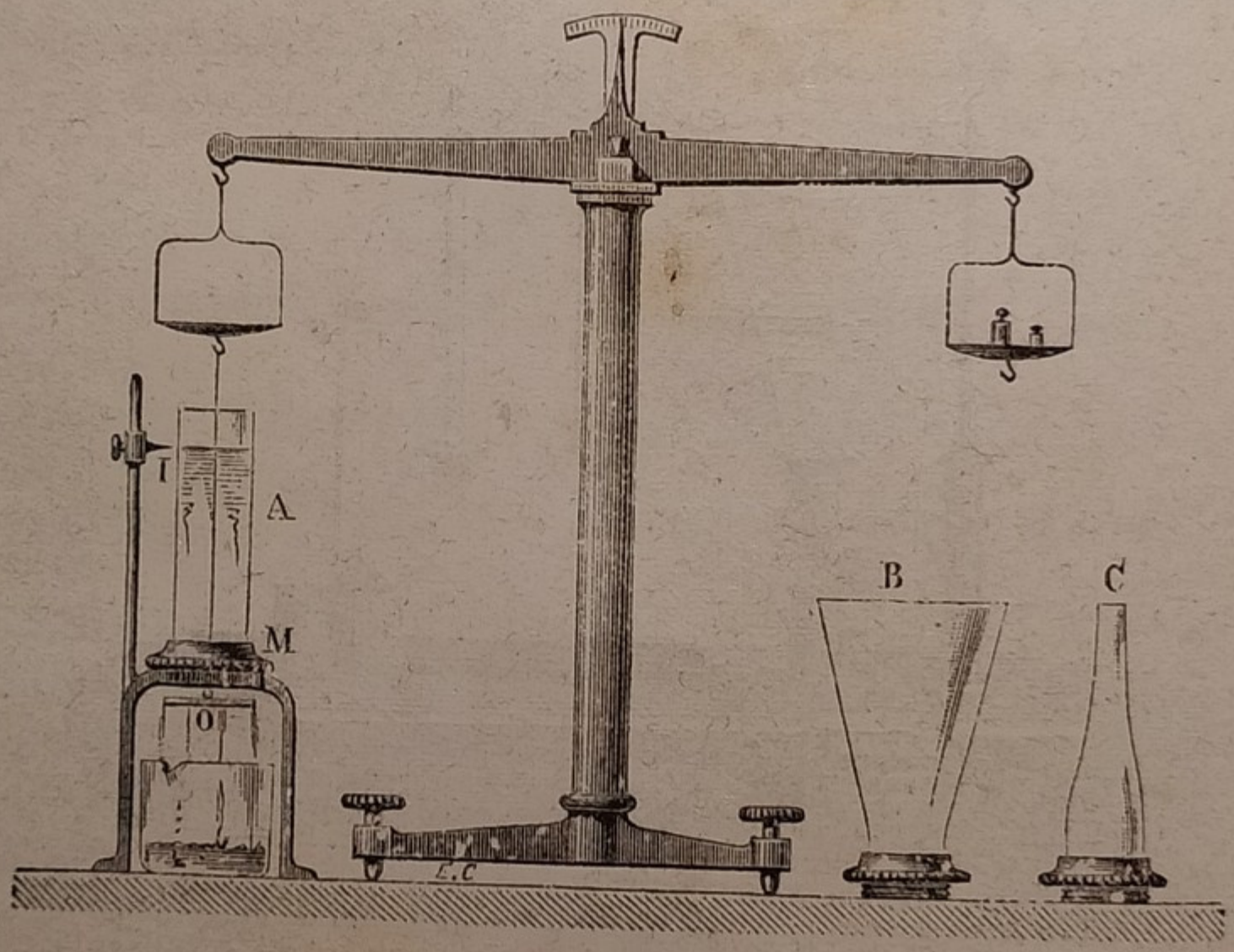


Fig. 76.

4. 2ª Prova sperimentale. — Lo stesso fatto si può dimostrare sperimentalmente mediante un altro apparecchio (rappresentato dalla fig. 76) nel quale il fondo eguale di tre vasi (A, B, C) viene turato da un disco appeso con un filo ad uno dei piatti di una bilancia, e trattenuto con un'adatta trazione mediante un peso collocato sull'altro piatto. Si applica dapprima il recipiente cilindrico, e si versa in esso acqua finchè avvenga il distacco dell'otturatore. Si nota con una punta (1) il livello che aveva il liquido al momento del distacco. Allora si sostituiscono successivamente al vaso cilindrico gli altri due di egual base, ma di diverso diametro, e si trova che per effettuare il distacco si richiede sempre la stessa altezza di liquido.

Di più con detto apparecchio si può verificare che il peso necessario per trattenere l'otturatore è eguale al peso del cilindro liquido che ha la sua base e l'altezza comune.

5. Paradosso idrostatico. — La pressione sul fondo è dunque indipendente dalla forma del vaso e dalla quantità del liquido; tutti i vasi, di egual fondo e di eguale altezza di liquido, provano la stessa pressione sul fondo, sebbene contengano diversissime quantità di liquido.

Tale proposizione, che pare a primo aspetto inverosimile, chiamasi: *paradosso idrostatico.*

6. Interpretazione del paradosso idrostatico col principio di Pascal. — Consideriamo tre recipienti (S, S′, S″, fig. 77) tali che mentre hanno egual base, l'uno S abbia un diametro costante ed eguale a quello della base, l'altro (S′) si allarghi per modo da acquistare un diametro doppio, e quindi una sezione quadrupla del precedente, e l'ultimo (S″) si stringa per modo d'acquistare un diametro metà di quello della base, e quindi una sezione $^1/_4$.

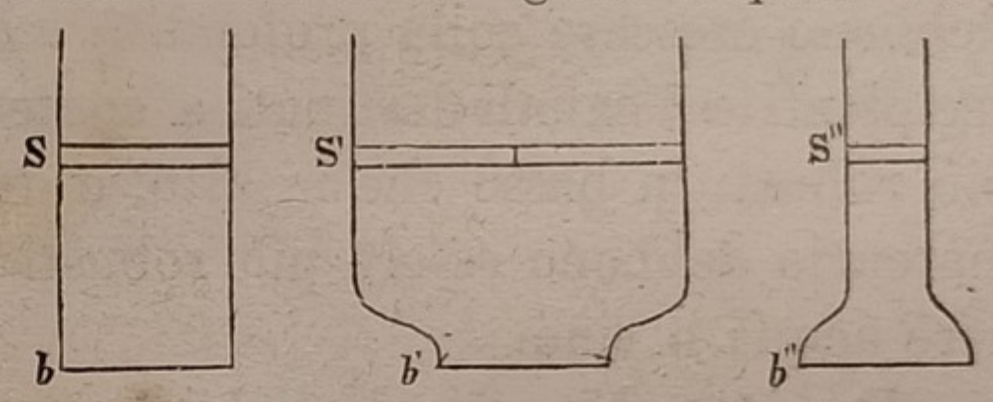


Fig. 77.

Supponiamo i tre recipienti pieni d'acqua e consideriamo nei medesimi uno strato di liquido di un centimetro di altezza. Supposto, per fissare le idee, che la base eguale dei tre recipienti sia di 100 centimetri quadrati, lo strato (S) del primo recipiente ha un volume di 100 centimetri cubici, ossia il peso di 100 grammi, e preme il fondo di eguale superficie colla pressione di 100 grammi. Lo strato (S′) di diametro doppio, e quindi di base quadrupla = 400 centimetri quadrati, ha un volume di 400 centimetri cubici e un peso di 400 *gr.*; ma, trasmettendosi le pressioni proporzionatamente alle superfici, esercita sul fondo la pressione di 100 *gr.* come il primo (S). Finalmente lo strato (S″), di diametro metà, ha la base quattro volte minore del primo, cioè di 25 centimetri quadrati, quindi un peso di 25 *gr.*; ma, trasmettendosi le pressioni proporzionatamente alle superfici, esercita sul fondo la pressione 100 come gli altri due strati (S, S′).

E siccome le considerazioni esposte per quello strato valgono per gli altri, perciò si vede che *il paradosso idrostatico è una conseguenza del principio di Pascal.*

7. Peso di un vaso contenente liquido. — Dunque la pressione su fondo di un recipiente a pareti verticali è eguale esattamente al peso del liquido contenuto; in un recipiente che si allarga è invece minore, e in uno che si stringe è maggiore del peso del liquido contenuto.

Quantunque poi una stessa quantità di liquido possa esercitare assai differente pressione sul fondo di un recipiente secondo la forma del medesimo, la pressione che il vaso ed il liquido in esso contenuto esercitano sul piano che li sostiene è sempre solo eguale al peso del vaso più il peso del liquido.

§ 49. Pressioni dei liquidi sulle pareti laterali dei recipienti.

1. Pressione laterale dei liquidi. — Dal principio di Pascal, che le pressioni nei liquidi si trasmettono in tutti i sensi, consegue che essi col loro peso premono non solo il fondo dei recipienti, ma anche le pareti laterali. Infatti se si fa un foro in una di queste, il liquido ne effluisce. Quindi la parete che impediva quell'efflusso doveva sopportare una pressione.

Queste due pressioni, sul fondo e sulle pareti, evidentemente debbono crescere colla profondità e densità del liquido. Perciò i recipienti e i canali destinati a contenere i liquidi devono essere più robusti in basso che in alto, e quelli che debbono contenere mercurio debbono essere più robusti di quelli destinati a contenere acqua o vino.

Per intendere il valore della pressione dei liquidi sulle pareti laterali dei recipienti consideriamo, per es., una vasca rettangolare piena d'acqua; è evidente che i diversi punti di una delle sue pareti laterali sopportano pressioni crescenti colla profondità dei medesimi sotto il livello del liquido, e che il peso di tutte le colonne liquide di altezza crescente che premono i diversi punti di quella parete equivale al peso di altrettante colonne liquide aventi la stessa altezza media. Ora il calcolo dimostra che questa media è la distanza del centro di gravità della porzione di parete premuta dalla superficie di livello. Quindi risulta che: *la pressione di un liquido sulla parete laterale di un recipiente è eguale al peso di una colonna liquida avente per base la porzione della parete in contatto col liquido e per altezza la distanza del centro di gravità di quella parte della parete dal livello del medesimo.*

Perciò se un cubo cavo è pieno di liquido la pressione su ciascuna faccia laterale è metà di quella sul fondo, e la pressione sulle 4 facce laterali è doppia di quella sul fondo.

La detta pressione si manifesta nei seguenti apparecchi.

2. Galleggiante a reazione. — Se si mette sull'acqua un recipiente cilindrico pieno di essa (E, fig. 78), sostenuto da un bacino,

e la cui parete laterale è munita in basso di un tubo laterale di efflusso, con chiavetta, finchè questa è chiusa il recipiente rimane in quiete, perchè le pressioni sui diversi punti della parete sono a due a due eguali e contrarie e perciò si fanno equilibrio. Ma se si apre la chiavetta si vede l'apparecchio muoversi in senso contrario all'efflusso, perchè nel punto in cui il liquido effluisce viene a mancare la pressione, e perciò quella eguale e contraria che persiste nel punto diametralmente opposto produce il movimento del galleggiante.

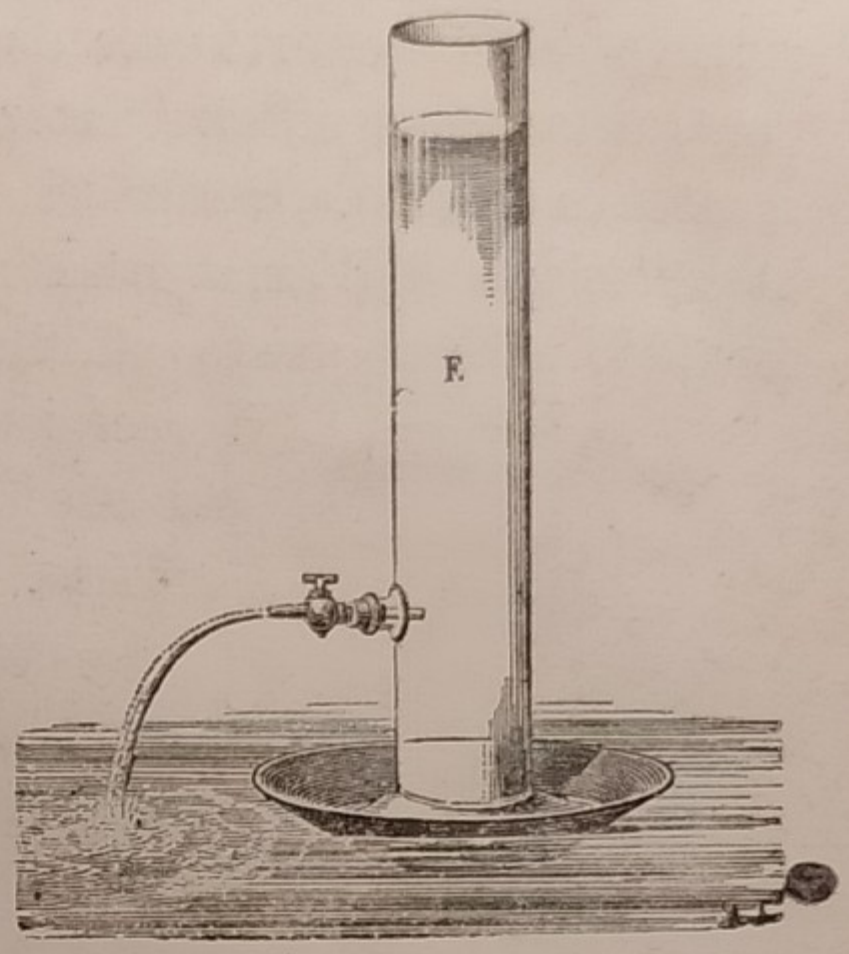


Fig. 78.

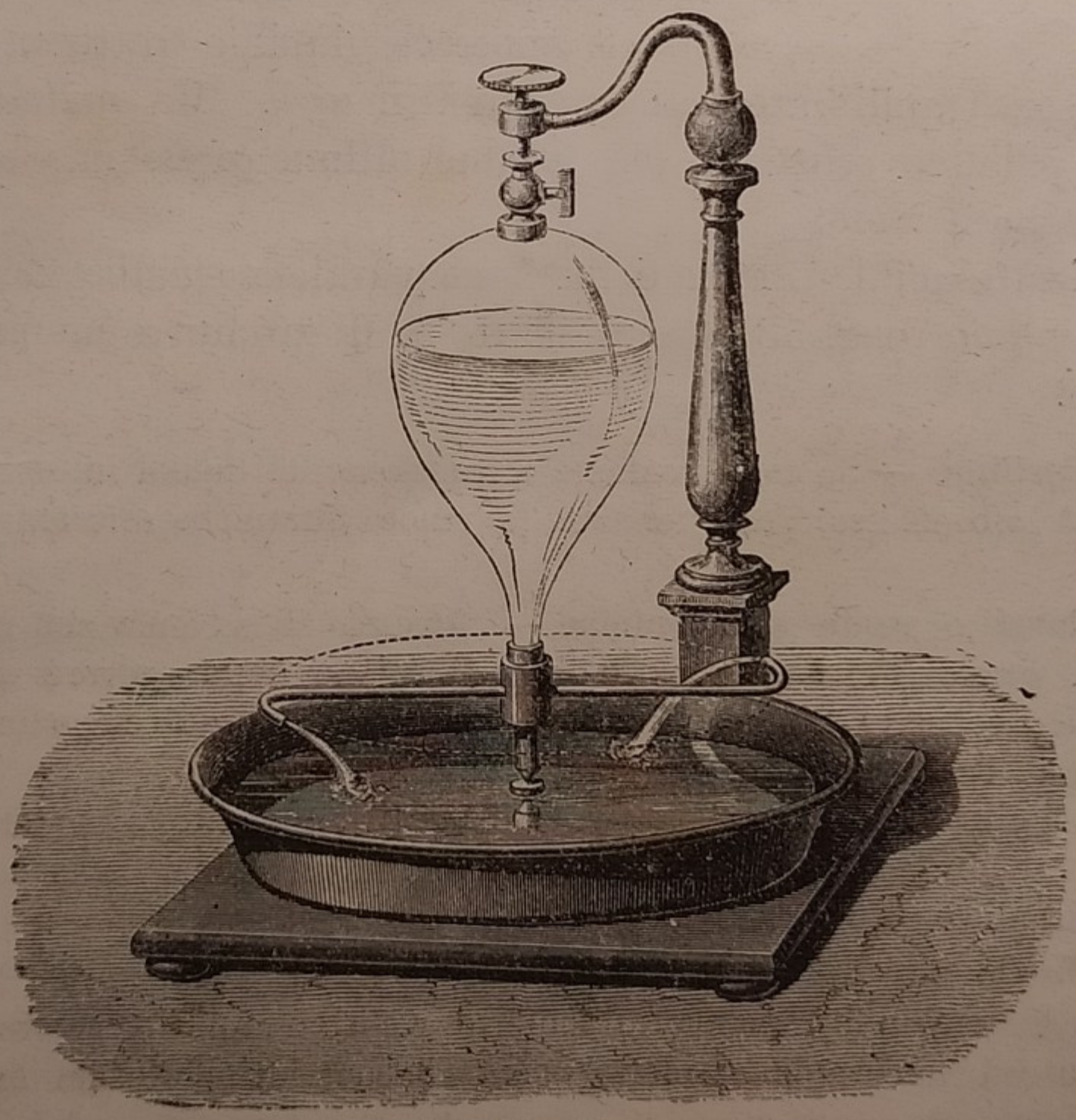


Fig. 79.

3. L'arganetto idraulico *è un apparecchio nel quale la pressione laterale di un liquido produce un moto di rotazione.*

— Consiste in un vaso di vetro (fig. 79) girevole su due perni verticali, munito nella sua parte inferiore di un tubo orizzontale ricurvo ad S e aperto alle due estremità, sì che l'acqua in esso contenuta possa effluire lateralmente in senso contrario (come mostra la figura). Quando si apre la chiavetta superiore, affinchè la pressione dell'aria possa agire sulla superficie superiore del liquido, allora questo effluisce dalle due bocche del tubo, ed il recipiente si mette a girare attorno al suo asse, in direzione contraria a quella dell'efflusso.

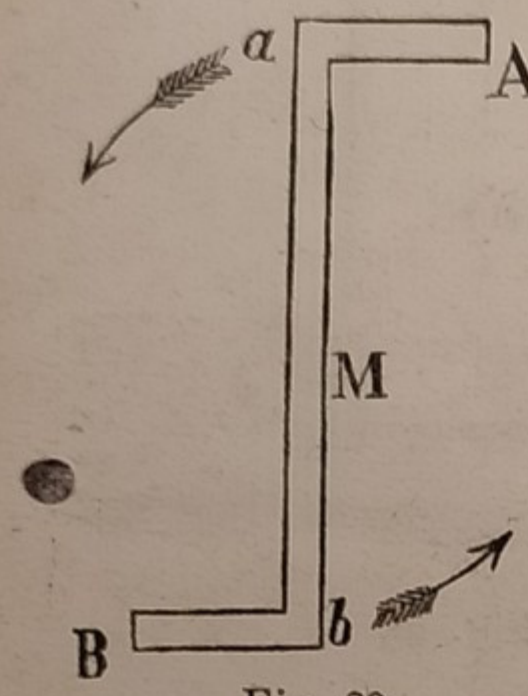


Fig. 80.

La causa di tale moto rotatorio è evidentemente la pressione che ha luogo sui punti della parete del tubo di efflusso opposti ai due fori. Infatti, se A M B (fig. 80) rappresenta il tubo orizzontale dell'arganetto, finchè il liquido non esce le pressioni in A e B contro le molecole liquide trattenute dall'aria sono equilibrate dalle pressioni in *a*, *b*. Ma quando il liquido effluisce esistono solo le due ultime pressioni, le quali producono il moto.

Risulta qui il sistema di due forze parallele eguali e contrarie detto *coppia* (pag. 53) il cui effetto è di produrre un moto rotatorio.

4. Turbine. — Su tale reazione, o pressione dei liquidi in senso contrario al loro efflusso, sono fondate le ruote idrauliche orizzontali dette *turbine*.

5. Razzi e ruote pirotecniche. — Quando si accende un razzo la materia gazosa che si sviluppa dalla combustione della polvere che esso contiene esce per l'estremità inferiore, ma esercita ad un tempo una pressione sulla base superiore, la quale fa sollevare il razzo.

I medesimi razzi convenientemente disposti perpendicolarmente ai raggi delle ruote pirotecniche mobili ne producono la rotazione, come nell'arganetto idraulico.

6. Movimento dei cefalopodi. — Per la stessa reazione dei liquidi i cefalopodi (molluschi) nuotano all'indietro a sbalzi rapidi come freccie, rigettando con violenza dal cosidetto *imbuto* l'acqua introdotta nel loro corpo.

7. Centro di pressione. — Il punto della parete laterale pel quale passa la risultante delle pressioni sulla medesima dicesi il *centro di pressione*. Esso non coincide col centro di gravità della parete premuta, perchè le forze parallele prementi non sono uguali come le forze parallele di gravità

delle diverse molecole della parete, ma vanno crescendo di intensità verso il basso; perciò il centro di pressione è sempre inferiore al centro di gravità.

§ 50. Equilibrio di un liquido contenuto in vasi comunicanti.

1. Esperienza. — Versando un liquido in due o più vasi comunicanti fra loro in basso ma di diverso diametro e forma (fig. 81) si vede che esso si eleva alla stessa altezza in tutti, eccettuato il caso in cui uno dei vasi sia soverchiamente stretto, perchè allora intervengono i fenomeni di coesione e adesione a modificare le condizioni dell'equilibrio, come si vedrà più innanzi.

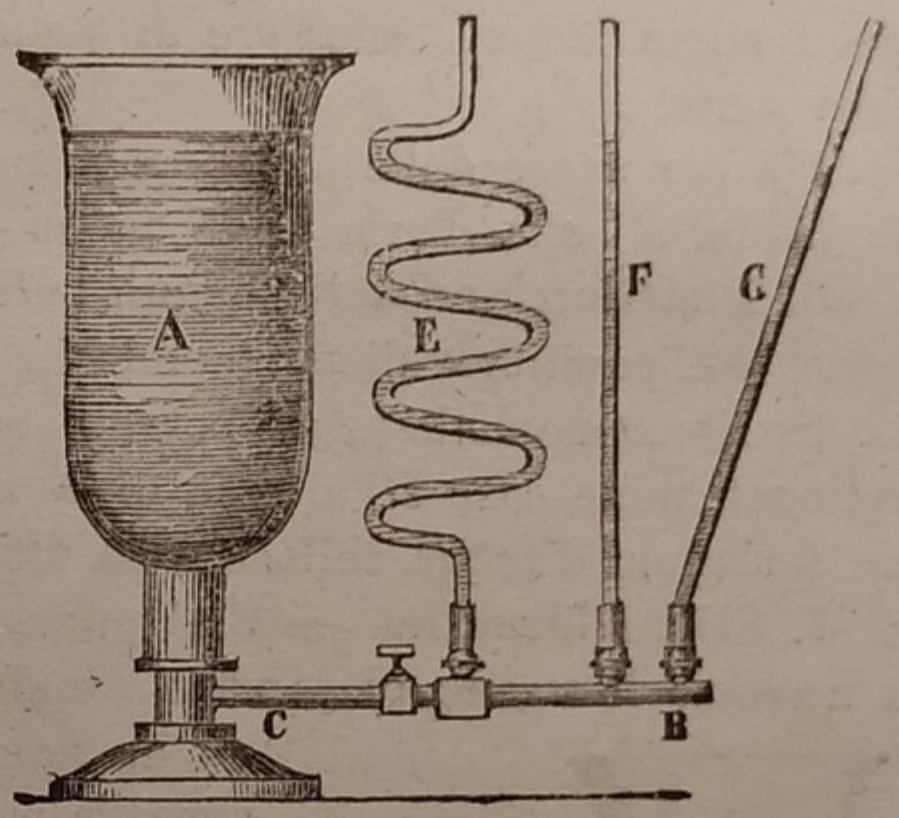


Fig. 81.

2. — Quindi la seguente **legge:** *nei vasi comunicanti un medesimo liquido si eleva alla stessa altezza.*

3. Dimostrazione razionale della legge. — Consideriamo una sezione verticale nel tubo (C) di comunicazione di due vasi comunicanti. Perchè le particelle liquide situate in tale sezione siano in equilibrio è necessario che esse siano spinte egualmente da ambe le parti. Ora tali spinte sono date dai pesi di due colonne liquide aventi per base la sezione che si considera, e per altezza la distanza verticale del suo centro di gravità dalla superficie del liquido. Codeste colonne avendo egual base debbono pure avere eguale altezza per avere egual peso. Quindi si vede che l'equilibrio non può esistere se il liquido non ha raggiunto nei vasi comunicanti la stessa altezza.

4. Indicatori del livello. — La legge dei vasi comunicanti viene applicata negli *indicatori di livello*, che sono tubi di vetro comunicanti con un recipiente contenente un liquido, ad es., colla caldaia di una macchina a vapore, e nei quali si vede il livello del liquido nel recipiente.

5. Livella ad acqua. — È pure un'applicazione della precedente legge la *livella ad acqua*, che è un tubo metallico (fig. 82), le cui estremità piegate a gomito portano due recipienti di vetro, ed è sostenuto da tre gambe mobili, per cui si può disporre a conveniente altezza.

Se si versa acqua nell'un recipiente, essa sollevasi nell'altro ad eguale altezza sull'orizzonte, e serve così a fissare la direzione di una linea orizzontale.

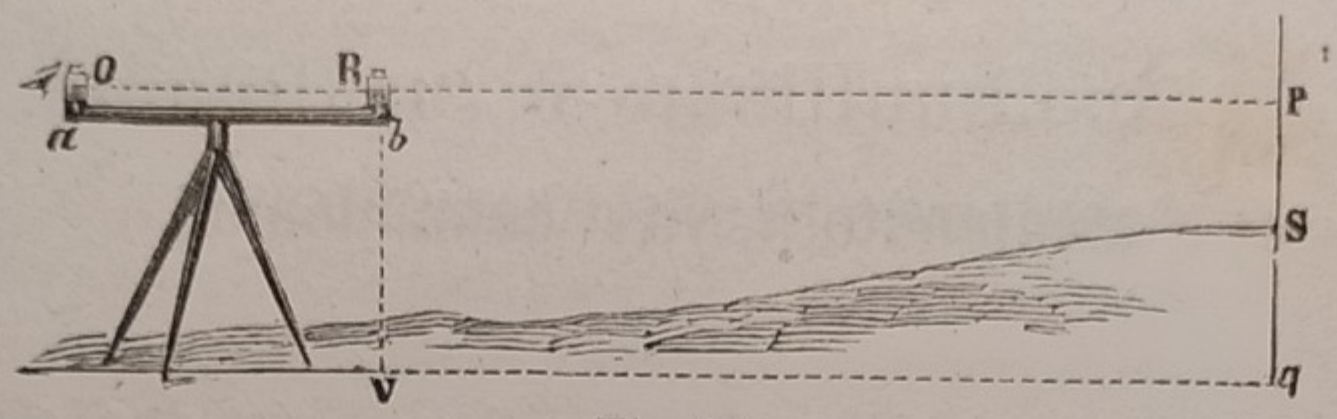


Fig. 82.

Misurando la distanza verticale fra questa linea e due luoghi diversi del terreno si può conoscere di quanto l'uno è più elevato dell'altro sull'orizzonte.

Ma per avere determinazioni più esatte delle differenze di livello si usa la livella a bolla d'aria unita ad un cannocchiale.

6. Distribuzione delle acque potabili nelle città. — Sulla enunciata legge dell'equilibrio di un liquido in più vasi comunicanti è pure fondata la distribuzione delle acque potabili nelle città. L'acqua si solleva nei tubi collocati nelle case all'altezza di 20 a 30 metri, perchè essi comunicano con un serbatoio d'acqua collocato ad altezza alquanto maggiore.

7. Sifoni idraulici. — Così pure, l'acqua dei canali vien fatta passare a traverso le strade, piegando il canale ad U sotto di esse. L'acqua discende da un fianco della strada, passa sotto la medesima, e poi si solleva dall'altro fianco a pari altezza. Si dà a tale ripiegatura del canale il nome di *sifone*.

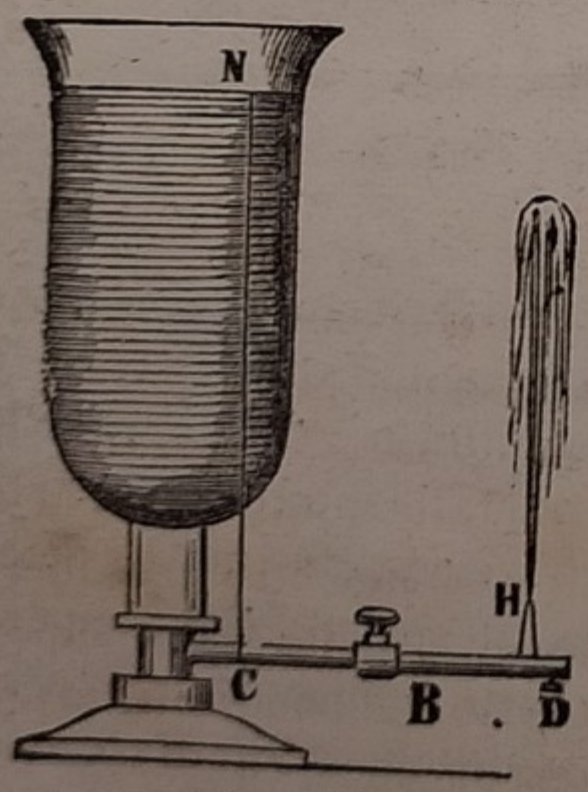


Fig. 83.

8. Zampilli. — Se poi uno dei tubi comunicanti non arriva all'altezza degli altri, ed è aperto, ne esce uno zampillo (fig. 83), perchè l'acqua tende a salire all'altezza a cui si trova negli altri. Se non sale precisamente a tale altezza si è per le resistenze che incontra, sia per parte dell'aria, sia per l'attrito nei tubi.

9. Pozzi salienti o trivellati. — Si dicono *salienti*, o *zampillanti*, i pozzi in cui l'acqua zampilla ad altezza più o meno grande.

Sono fori (*r*, *n*, *l*, fig. 84) più o meno profondi, scavati con istrumenti detti *trivelle*, d'onde anche il nome di *pozzi trivellati*. Chiamansi anche pozzi *artesiani*, perchè ve ne sono molti nella contea di Artois, nel nord della Francia. E diconsi pure *modenesi*, perchè prima che in Francia, furono praticati tali pozzi nel Modenese, tanto che la città di Modena ha una tri-

vella sul suo stemma. I Chinesi poi li conoscevano da remotissima antichità Dopo il 1855 la parte orientale del deserto di Sahara fu arricchita e fertilizzata mediante un gran numero di pozzi trivellati.

La trivella piglia forma di un succhiello, o di una lancia, o di una pala, ecc., secondo la natura del terreno che si vuole forare. A misura che il pozzo si fa più profondo, l'asta che porta la trivella si congiunge ad un'altra e si continua in tal guisa finchè è necessario. Inoltre, a misura che il foro avanza, si spingono nel medesimo tubi di ferro del diametro di 1 a 2 decimetri, l'un dopo l'altro, per trattenere il terreno.

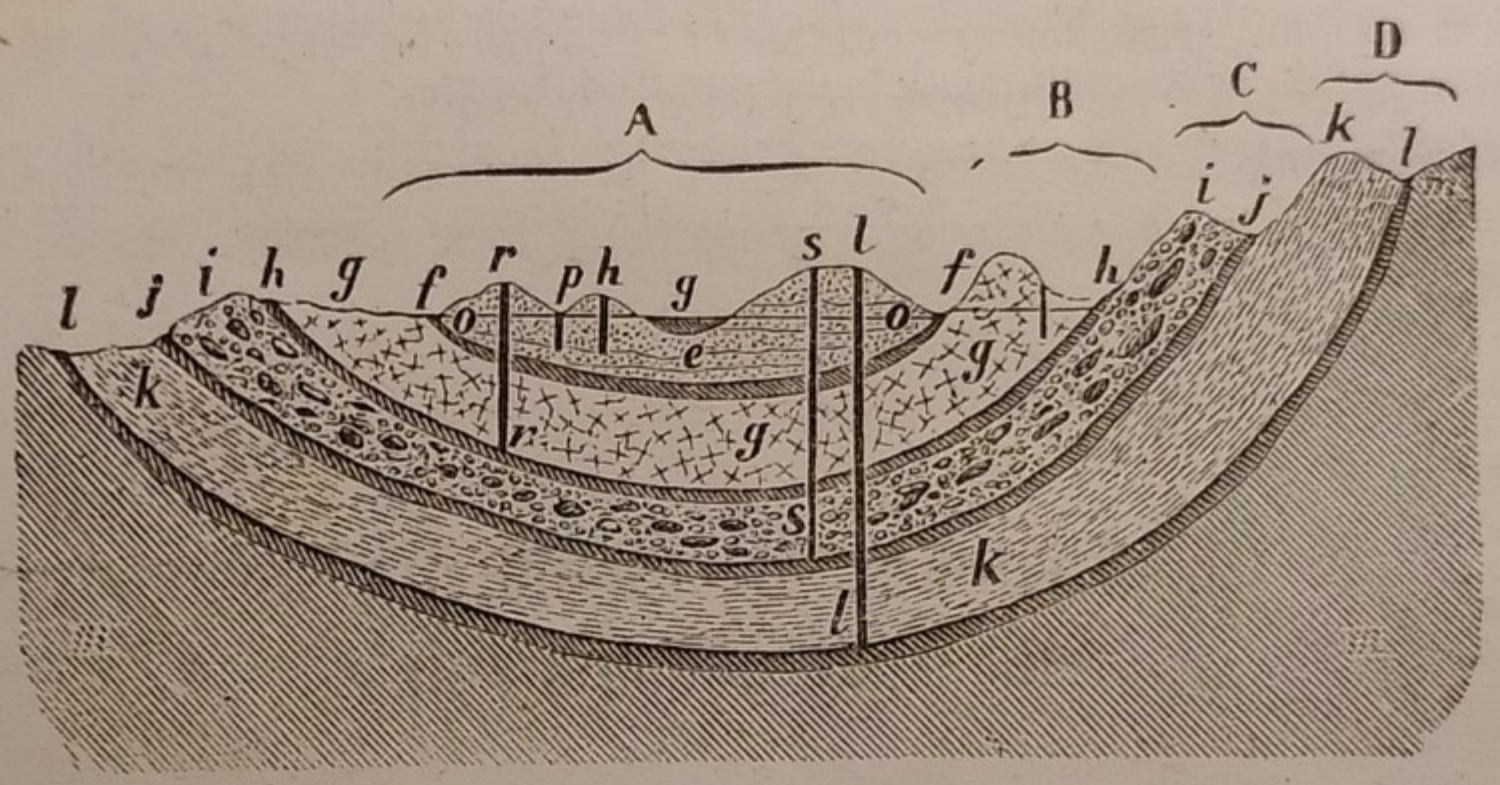


Fig. 84.

La profondità di tali pozzi è variabile secondo i luoghi, e l'acqua, od è zampillante sopra il suolo, ovvero giunge a poca distanza dalla sua superficie, così che può essere facilmente attinta.

Il pozzo trivellato di Grenelle, presso Parigi, ha 548 metri di profondità e dà 2400 litri d'acqua al minuto, la quale è a 27° in ogni stagione. Il pozzo artesiano di Passy ha 587 metri di profondità, e l'acqua ha la temperatura di 28°. Pest possiede un pozzo artesiano di 970 *m.*, che somministra acqua a 74°.

10. Teoria dei pozzi trivellati. — *I pozzi artesiani sono pure fondati sulla legge dell'equilibrio di un liquido nei vasi comunicanti.* — Infatti, il suolo è costituito da strati più o meno inclinati, di sostanze diverse; alcuni (*k k*, *i i*, *g g*), di ciottoli, o ghiaia, o sabbia, e questi sono permeabili all'acqua; altri (*l l*, *j j*, *h h*, *f f*) di argilla o di roccia, e questi sono poco permeabili.

Ora, perchè si ottenga un zampillante filo d'acqua forando il suolo colla trivella, si richiede dapprima che l'acqua penetri nella parte più elevata (B, C, D) di uno strato permeabile, il quale continui fin sotto la posizione del foro, e poscia che questo strato, che serve di canale all'acqua, sia racchiuso sopra e sotto fra strati impermeabili; allora esso zampilla nel foro per sollevarsi nel medesimo all'altezza a cui si trova nello strato permeabile.

Le acque che alimentano i pozzi artesiani vengono sovente dalla distanza di 100 e più chilometri.

11. Usi dei pozzi trivellati. — Il primitivo scopo dei pozzi artesiani fu di somministrare acqua potabile; la grande ricchezza delle acque e le qualità delle medesime li ha fatti poi servire ancora ad altri usi. In alcuni luoghi del nord della Francia si è potuto utilizzare lo zampillo per fare girare immediatamente la ruota di un molino; a Hellbroun (Germania), per mezzo di 5 pozzi artesiani, della profondità di 31 metri circa, si è provvisto una quantità d'acqua sufficiente per una fabbrica da carta, e per alcune officine industriali. Altri pozzi trivellati somministrano acque salse dalle quali si estrae sale di cucina, ed altri hanno dato acque medicinali.

12. Pozzi ordinari. — Se poi si fa un foro (p, h) solo nel terreno sovrastante al primo strato impermeabile ($f\,f$) l'acqua che è trattenuta da questo, penetrando nel foro, costituisce un pozzo ordinario.

13. Sorgenti. — Se infine le acque che scorrono nei terreni permeabili arrivano alla superficie dei medesimi allora costituiscono le sorgenti ordinarie.

§ 51. Equilibrio dei liquidi eterogenei nei vasi comunicanti.

1. Esperienza. — Se in un tubo ricurvo ad U (fig. 85) e fisso ad una tavoletta, su cui è segnata a lato di ciascun ramo una divisione in *cm.*, si versa mercurio finchè arrivi nei due rami ad una determinata altezza sopra lo zero della gradazione, ed infine si versa acqua in un ramo finchè la differenza del livello del mercurio nei due rami sia, per es., 2 *cm.*, si vede che l'altezza della colonna d'acqua che fa equilibrio a 2 *cm.* di mercurio è tante volte maggiore di questa, quante volte la densità dell'acqua è minore del mercurio, cioè è di $2 \times 13{,}5 = 27$ *cm.* circa.

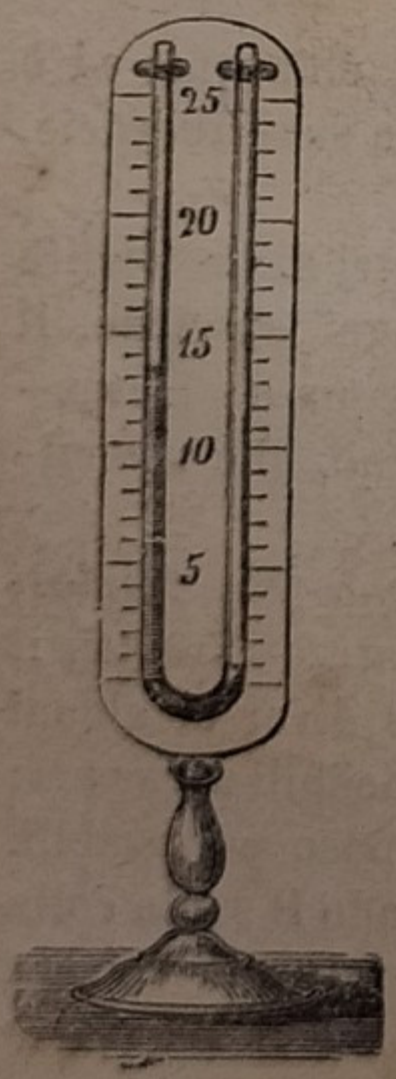


Fig. 85.

Analogamente avviene con altri liquidi.

2. — Quindi risulta la seguente **legge**: *le altezze delle colonne liquide che si fanno equilibrio nei vasi comunicanti sono in ragione inversa della loro densità.*

3. Dimostrazione. — Le colonne liquide eterogenee contenute in vasi comunicanti per farsi equilibrio debbono esercitare uguale pressione sulla loro superficie di separazione, e quindi quella del liquido di densità maggiore deve evidentemente avere una altezza altrettanto minore.

§ 52. Pressione verticale dei liquidi dal basso in alto.

1. Esperienza. — Se si prende un tubo di vetro aperto ad ambi i capi (fig. 86) e se ne tura la bocca inferiore, ad orlo smerigliato, mediante un disco di metallo o di legno che si sostiene con un filo, e poi lo si immerge nell'acqua, allora si può lasciare libero il filo senza che il disco cada. Se poi si versa lentamente dell'acqua nel tubo si vede il disco distaccarsi quando il livello del liquido nell'interno è presso a poco eguale al livello esterno.

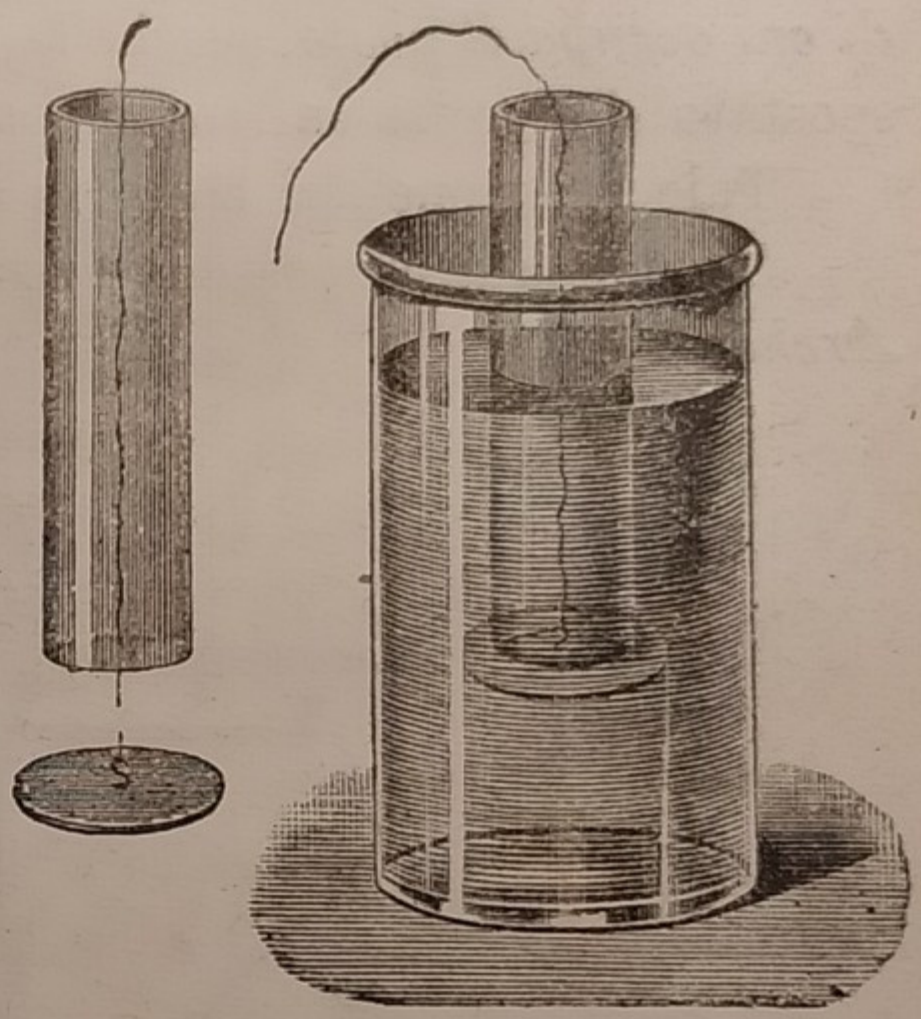


Fig. 86.

L'otturatore si distaccherebbe esattamente quando il livello interno raggiungesse quello esterno, se fosse fatto di materia avente la stessa densità o peso specifico del liquido, e se non agisse l'adesione.

Un esperimento analogo si può fare con un tubo piegato ad angolo retto.

2. Legge. — L'otturatore rimane applicato alla bocca inferiore del tubo quando questo è immerso nel liquido perchè la pressione verticale dall'alto in basso del liquido circostante al tubo e sovrastante al livello dell'otturatore, trasmettendosi in tutti i sensi, agisce anche dal basso in alto sull'otturatore stesso. E se questo non si distacca se non quando il livello interno raggiunge quello esterno, si deve concludere che: *nei liquidi le pressioni dovute alla gravità agiscono dal basso in alto, come dall'alto in basso.*

Il che è manifestamente una conseguenza del principio di Pascal.

§ 53. Il principio d'Archimede.

1. Spinta dei liquidi. — Se si affonda nell'acqua un tappo di sughero e poi lo si lascia libero si vede che esso è spinto a risalire, e rimane poi sulla superficie dell'acqua galleggiante.

Ciò avviene perchè ogni corpo *immerso in un liquido prova una spinta dal basso in alto, eguale al peso del volume liquido di cui occupa il posto*, perchè la pressione che sosteneva il liquido spostato si esercita sul corpo spostante.

Tale pressione dal basso in alto si dice *spinta* del liquido.

L'enunciata proposizione costituisce il celebre *principio di Archimede.*

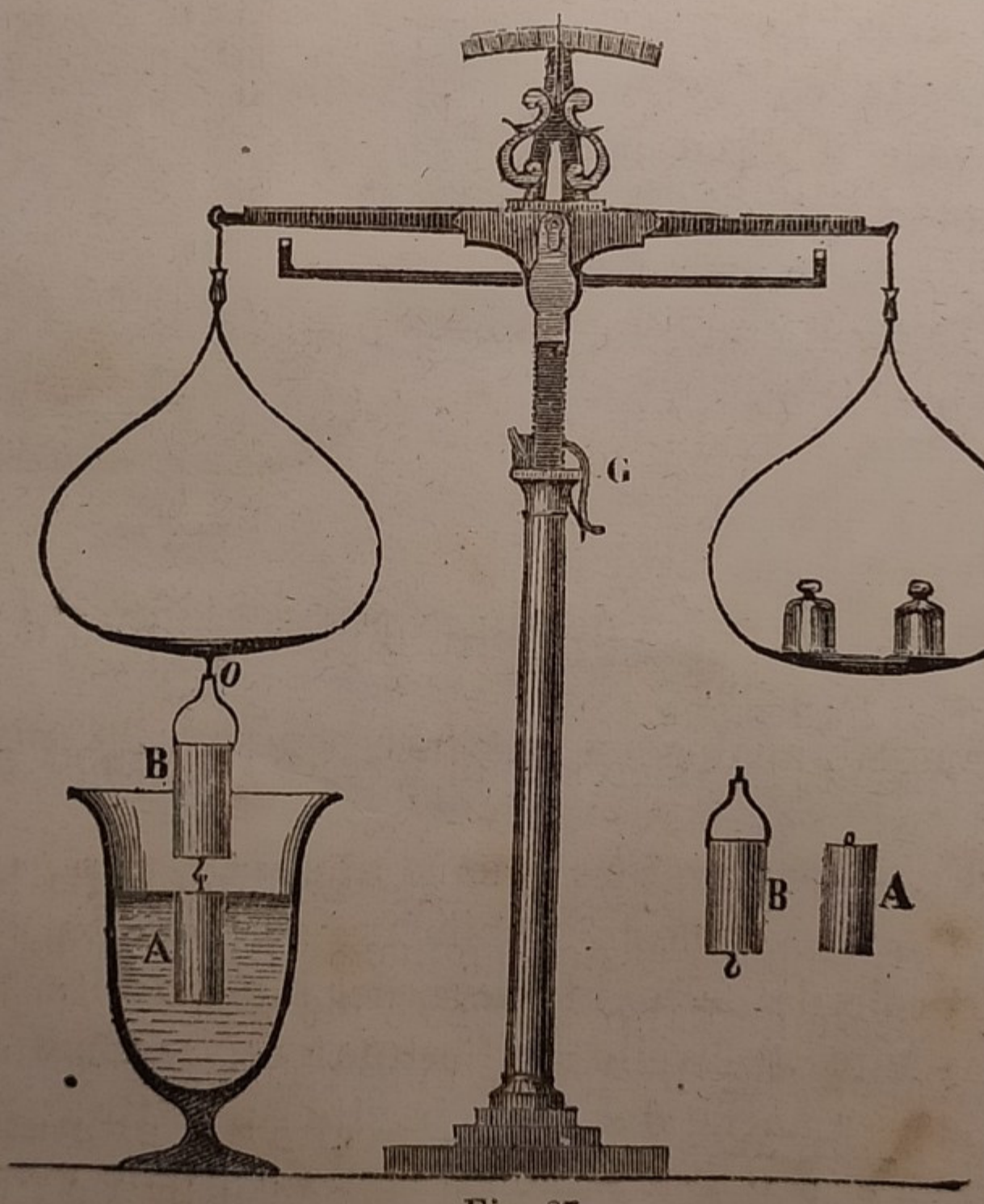


Fig. 87.

2. Prova sperimentale. — Si dimostra sperimentalmente il principio d'Archimede mediante la bilancia idrostatica (fig. 87), la quale non è che una bilancia ordinaria, uno de' cui piatti è inferiormente munito di uncino.

Sollevato alquanto il giogo, si sospende all'uncino un recipiente cilindrico di ottone (B), al disotto del quale si appende un altro cilindro (A) chiuso, il cui volume è esattamente eguale alla capacità del primo ; quindi sull'altro piatto si pongono pesi, od anche solo migliarola o sabbia, finchè si abbia l'equilibrio. Se allora si riempie esattamente d'acqua il cilindro cavo superiore, l'equilibrio è rotto, e il giogo si inclina da questa parte appoggiandosi sulla forchetta che lo trattiene; ma si ristabilisce l'equilibrio versando lentamente acqua nel recipiente che circonda il cilindro chiuso inferiore (A), finchè essa venga esattamente al livello della base superiore del medesimo.

La quale esperienza dimostra che il cilindro immerso nel liquido sopporta dal basso in alto una spinta eguale al peso dell'acqua contenuta nel cilindro aperto; e siccome la capacità di questo è perfettamente eguale al volume del cilindro chiuso si deve concludere che il corpo immerso sopporta dal basso in alto una spinta eguale al peso di un volume di liquido pari a quello della sua parte immersa.

3. Dimostrazione. — Per dare una spiegazione del principio di Archimede più analitica di quella sintetica già indicata (n° 1) si può osservare che, se si immerge, p. es., un cubo (fig. 88) in un liquido, in modo che le sue due faccie, superiore e inferiore, siano orizzontali, le pressioni del liquido sulle faccie laterali opposte sono eguali e contrarie, perciò si equilibrano, e rimangono solo le pressioni sulle dette faccie orizzontali, superiore e inferiore; ma la seconda, che agisce dal basso in alto, è manifestamente maggiore della prima, che agisce dall'alto in basso, del peso di un volume liquido eguale a quello del cubo; perciò questo è spinto in alto con una pressione eguale al peso di un pari volume di liquido.

Fig. 88.

Le stesse considerazioni valgono per un corpo di figura qualunque.

4. Effetti della spinta. — Quindi si intende perchè un corpo immerso nell'acqua si lascia muovere più facilmente che nell'aria. Così la secchia immersa nell'acqua si lascia facilmente sollevare finchè è nel liquido, ma essa sorprende ad un tratto pel suo peso tostochè ne viene estratta. Il pescatore che ha fatto ricca preda

muove facilmente la rete nell'acqua, ma fa uno sforzo maggiore per sollevarla nell'aria. Nelle costruzioni sott'acqua i lavoranti muovono facilmente grosse pietre che non possono con eguale facilità muovere nell'aria.

5. Modo di determinare il volume di un corpo qualunque. — Si può col principio di Archimede ottenere il volume di un corpo per quanto irregolare sia la sua forma. Perciò lo si pesa nell'aria, quindi si sospende all'uncino d'una bilancia idrostatica, e fattolo immergere nell'acqua, si nota la diminuzione di peso. Supponiamo che sia 20 *gr.*; questo indica che l'acqua spostata dal corpo pesa 20 *gr.* Ora siccome il gramma è il peso d'un centimetro cubico d'acqua distillata a + 4°, il volume dell'acqua rimossa sarà 20 *cm.* cubi, supposto che essa abbia la detta temperatura. Ma il volume del corpo è uguale a quello del liquido di cui occupa il posto, quindi esso pure sarà di 20 *cm.* cubi.

Se la temperatura dell'acqua è diversa da + 4, allora si debbono fare correzioni che insegna la dottrina del calore.

§ 54. Equilibrio dei corpi immersi nei liquidi.

1. Osservazioni ed esperimenti. — Tutti sanno che il legno in generale (*), galleggia sull'acqua, perchè pesa meno di un pari volume di questa, e che invece il ferro va a fondo perchè pesa più di un pari volume di essa. Ma se si mette il ferro nel mercurio lo si vede galleggiare, perchè pesa meno di un pari volume di questo liquido. Infatti il ferro pesa circa 7 volte più che un pari volume d'acqua, e il mercurio circa 14 volte.

Così pure il ghiaccio galleggia sull'acqua perchè pesa meno di un pari volume di essa, poichè l'acqua congelandosi aumenta di volume.

E quando un corpo pesa esattamente come il liquido in cui è immerso esso resta sospeso nel liquido. Così una goccia di olio resta sospesa in un miscuglio di acqua e alcool che abbia la stessa densità dell'olio.

(*) Vi sono anche legni più pesanti di un pari volume d'acqua, i quali perciò vanno a fondo.

Parimenti un uovo va a fondo nell'acqua pura, perchè pesa più di questa a pari volume (fig. 89) *a*): galleggia invece nell'acqua molto salata (*c*) perchè pesa meno di un pari volume di essa, e sta sospeso nell'acqua mediocremente salata (*b*) perchè ha peso eguale.

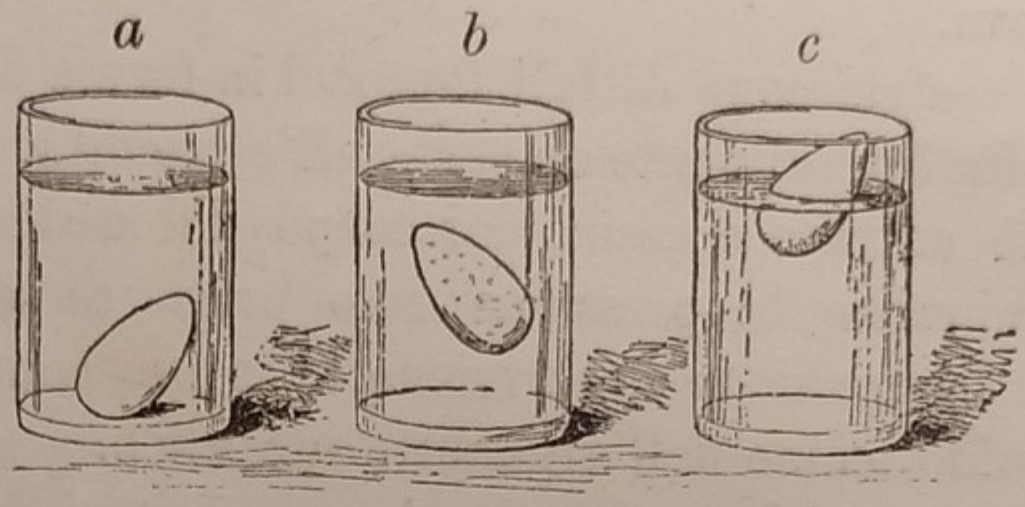


Fig. 89.

2. Legge dell'equilibrio verticale dei corpi immersi nei liquidi. — Dai fatti esposti risulta che: *un corpo immerso in un liquido si affonda se pesa più di un pari volume di esso; rimane sospeso e totalmente immerso se ha peso eguale; galleggia se pesa meno di un pari volume di liquido.*

3. Ludione. — Questi diversi casi sono realizzati nell'apparecchio denominato *ludione*, o *diavolo di Cartesio*, che è un fantoccio di vetro (fig. 90) contenente acqua ed aria nell'interno, cosicchè esso riesce un tantino più leggiero di un egual volume d'acqua, e perciò galleggia in questa; inoltre ha in un punto un forellino pel quale l'acqua interna può comunicare coll'esterna in cui è immerso entro una bottiglia, o altro recipiente chiuso superiormente da una lamina di caucciù ben legata intorno e distesa.

Fig. 90.

Prima di immergere il fantoccio nell'acqua si riscalda alquanto l'aria contenuta nel suo interno per modo da farne uscire una parte pel forellino; ponendolo allora nel liquido, questo penetra nella cavità interna e ne riempie una parte. Bisogna regolare l'efflusso dell'aria dall'interno permodochè il fantoccio galleggi appena sull'acqua.

Se allora si preme col dito la lamina e quindi l'acqua della bottiglia, il fantoccio scende, e al diminuire della pressione di

nuovo ascende, perchè l'acqua premuta entra alcun poco nel medesimo pel forellino, comprimendo l'aria in esso contenuta al di sopra del liquido; perciò cresce il suo peso ed esso discende; cessata la pressione, l'aria compressa nuovamente si dilata ricacciando fuori l'acqua entrata, e perciò quello nuovamente si solleva.

Oggidì si costruiscono di tali fantocci in forma di diavolo con una coda rivolta lateralmente e aperta all'estremità, per la quale il liquido può entrare e uscire dal corpo del medesimo: allora, quando si diminuisce la pressione, esso prima di sollevarsi gira alquanto, per la pressione che avviene in senso contrario all'efflusso del liquido, come nell'arganetto idraulico.

Anzi tali fantocci hanno anche le gambe snodate, cosicchè per grande pressione seggono sul fondo del vaso.

4. Volume della parte immersa di un corpo galleggiante. — Il ferro avendo, a pari volume, un peso circa metà di quello del mercurio, si affonda in questo per circa metà del suo volume, perchè un volume di mercurio circa metà di quello del ferro ha peso eguale.

In generale: *quando un corpo galleggia, il peso del liquido rimosso è eguale al peso del corpo*, perchè solo allora la spinta del liquido è eguale al peso del corpo.

5. Galleggiamento dei corpi più densi dei liquidi. — Un corpo può anche galleggiare in un liquido quantunque pesi più di un pari volume di questo, purchè per la sua forma possa spostarne un volume il cui peso sia eguale al proprio, senza che quello entri nell'interno. Così un bicchiere diritto galleggia sull'acqua, quantunque il vetro a pari volume sia più pesante dell'acqua. Così pure le navi corazzate di lastre di acciaio galleggiano sull'acqua.

6. Condizione per la stabilità dell'equilibrio di un corpo galleggiante. — Se si mette nell'acqua una campanella di vetro chiusa inferiormente, si vede che è impossibile farla stare diritta; ma se si versa in essa un poco di migliarola di piombo, allora si vede che la campanella comunque inclinata si rimette da sè nella posizione verticale.

Ciò avviene perchè, quando la campanella è vuota, si trova sotto l'azione del suo peso, che si riduce ad una forza verticale

diretta in basso ed applicata nel suo centro di gravità, che è verso il mezzo del suo asse, e della spinta del liquido che si riduce ad una forza verticale diretta dal basso in alto ed applicata nel centro di gravità di liquido spostato, il quale perciò dicesi anche *centro di spinta*. Ora tale punto è necessariamente sotto il centro di gravità della campanella quando essa vuota si immerge nell'acqua solo per una piccola parte della sua lunghezza, e qneste due forze eguali e contrarie potrebbero solo farsi equilibrio nel caso in cui agissero secondo la stessa verticale; ma per poco che la campanella sia inclinata costituiscono una coppia (pag. 53) che agisce in modo da inclinare vieppiù la campanella.

Invece quando si mette in essa un peso allora il centro di gravità scende verso il fondo, e quindi al di sotto del centro di gravità del liquido rimosso dalla campanella. Ivi sarà adunque applicata una forza verticale diretta dall'alto in basso, mentre nel sovrastante centro di gravità del liquido spostato agisce una forza verticale diretta dal basso in alto, e quando la campanella è inclinata si trova sotto l'azione di una coppia che agisce per rimetterla nella posizione verticale. Dunque: *un corpo galleggiante in un liquido, e il cui centro di gravità è inferiore a quello del liquido spostato, ha equilibrio stabile.*

7. Metacentro. — Un corpo sospeso in un liquido e totalmente o parzialmente immerso nel medesimo ha sempre equilibrio stabile se il suo

Fig. 91.

Fig. 92.

centro di gravità è al di sotto di quello del liquido spostato, come venne ora esposto. Ma un corpo galleggiante può ancora avere equilibrio stabile, quantunque il suo centro di gravità sia superiore a quello del liquido spostato, purchè sia inferiore ad un altro punto detto *metacentro*.

Infatti, consideriamo, per semplicità, un prisma A B C D (fig. 91) di legno o altra materia galleggiante nell'acqua. Sia S il centro di gravità del prisma e T quello del liquido spostato, E F la verticale passante pei detti centri quando il prisma è in equilibrio, la quale si denomina *asse del galleggiante.*

Se il prisma viene inclinato (fig. 92), il suo centro di gravità rimane sempre in S, ma il centro di gravità del liquido spostato prende una nuova posizione T′. In questo punto agisce adunque la forza verticale T′ M, dal basso in alto.

Ora è evidente che, se la direzione di questa forza incontra l'asse E F del galleggiante in un punto M superiore al suo centro di gravità S, essa tende a rimetterlo nella posizione primiera; se invece la direzione di tale forza incontrasse l'asse E F in un punto inferiore ad S, essa tenderebbe a farlo inclinare vieppiù e quindi a rovesciarlo.

Il punto M in cui la direzione della spinta del liquido, quando il galleggiante si inclina, incontra l'asse del galleggiante, denominasi *metacentro*, e dalle considerazioni fatte risulta la seguente proposizione: *un corpo galleggiante il cui centro di gravità è superiore a quello del liquido spostato ha ancora equilibrio stabile se il detto centro è inferiore al metacentro.*

8. Nuoto. — Sebbene la carne, il grasso e le ossa siano più pesanti di un pari volume d'acqua, e perciò vadano al fondo di questa, tuttavia il corpo umano può galleggiare su tal liquido, perchè in esso si trovano delle cavità, come quelle dei polmoni, dello stomaco, degli intestini.

Fig. 93.

Ma perchè l'acqua non penetri nell'interno del corpo, bisogna che il naso sia tenuto fuori dell'acqua. Ciò si ottiene facendo, come si dice, il *morto*, cioè ponendosi nell'acqua in posizione supina (la faccia in alto), in modo che anche la testa, escluso il naso, sia immersa nell'acqua.

Tale galleggiamento riesce più facile pei corpi grassi, perchè il grasso, a pari volume, pesa meno dei muscoli e delle ossa. Riesce poi anche più facile sull'acqua del mare che su quella dolce, perchè quella è, a pari volume, più pesante in causa del sale che contiene.

Se invece si nuota, come si fa ordinariamente, in posizione prona (colla faccia in basso, fig. 93), allora, perchè il naso sia fuori dell'acqua, deve pure essere fuori di essa la maggior parte della testa, e in tal caso non essendo sostenuta dall'acqua tende a discendere.

Quindi per nuotare in posizione prona, bisogna, mediante le braccia e le gambe, darsi delle spinte in direzione intermedia fra la verticale e l'orizzontale, perchè tali spinte producono appunto l'effetto di due componenti, una verticale, l'altra orizzontale. La prima ha per effetto di sostenere sovrattutto la parte anteriore del corpo, cioè la testa, che tende a cadere

perchè non sostenuta dall'acqua, e la seconda ha per effetto di far procedere innanzi il corpo. Queste spinte si ottengono distendendo contemporaneamente, o successivamente, le braccia innanzi al capo colle palme delle mani in basso, e poi abbassando queste in modo da urtare colle medesime l'acqua, mentre le gambe si muovono come fa la rana, cioè si piegano di fianco e poi si distendono indietro in modo da urtare l'acqua colle piante dei piedi.

Quelli che non sanno nuotare, quando cadono nell'acqua, rendono difficile il loro salvamento, sia perchè essi distendono le braccia fuori per invocare soccorso, nel quale modo sempre più affondano il capo, non essendo più le braccia immerse nell'acqua, e sia perchè tentano di avvinghiarsi alla persona che viene per soccorrerli.

Nel corpo degli annegati è penetrata l'acqua che lo ha portato in basso; ma dopo alcun tempo, succedendo la putrefazione, i gas che se ne sviluppano, lo fanno gonfiare, cosicchè esso ritorna a galla; più tardi, quei gas disperdendosi nell'aria, il corpo di nuovo affonda.

I nuotatori esperti possono anche affondarsi nell'acqua senza che questa entri pel naso e per la bocca, perchè tengono tali cavità in guisa che l'aria ne occupi la parte superiore, e così essa per la sua impenetrabilità impedisce all'acqua di salire, a quel modo che essa non sale in un bicchiere capovolto.

§ 55. Equilibrio dei fluidi non suscettibili di mescolarsi, contenuti in uno stesso recipiente.

1. Esperienza. — Se in una boccetta, o in un tubo di vetro (fig. 94), che si denomina la *fiala dei 4 elementi*, si mettono più liquidi non suscettibili di mescolarsi, per es., mercurio, acqua satura di carbonato potassico (perchè non si mescoli coll'alcool), alcool colorato in rosso (perchè sia visibile) e petrolio o benzina, scuotendo la boccetta in modo che i liquidi si mescano, e poi rimettendola verticalmente in riposo, si vede che il mercurio più denso si separa tosto e si raccoglie al fondo, indi si dispone al disopra del medesimo uno strato costituito dall'acqua satura di carbonato potassico, al di sopra della quale compare un 3° strato costituito dall'alcool colorato in rosso, meno denso dell'acqua, ed infine al di sopra di questo compare un 4° strato costituito dal petrolio meno denso dell'alcool.

Fig. 94.

L'acqua satura di carbonato potassico non si mescola coll'alcool, sia per la maggior differenza di densità, sia per l'insolubilità del carbonato nell'alcool.

2. — Dal fatto esposto, che si verifica in generale nei liquidi, risulta la seguente **legge**: *i liquidi non suscettibili di mescolarsi contenuti in un medesimo recipiente si dispongono l'uno sopra l'altro per ordine di densità, e le loro superfici di separazione sono orizzontali.*

Il fondamento di tale legge sta evidentemente nel principio di Archimede, che si verifica per ogni molecola dei liquidi mescolati.

3. Fenomeni relativi. — Alla foce dei fiumi l'acqua dolce di essi galleggia per una certa estensione sull'acqua salata, più pesante, dei mari; poi finisce per mescolarsi con questa, perchè l'una e l'altra sono suscettibili di mescolarsi, il che costituisce il fenomeno della diffusione dei liquidi, che studieremo più innanzi.

Parimenti i globuli di grasso contenuti nel latte lentamente si sollevano nel siero specificamente più pesante.

4. Livella a bolla d'aria. — È un tubo di vetro (fig. 95) leggermente ricurvo verso il mezzo, che contiene un liquido fluidissimo e che non si congeda facilmente, come l'alcool, e una bolla d'aria. Un astuccio metallico aperto superiormente lo protegge.

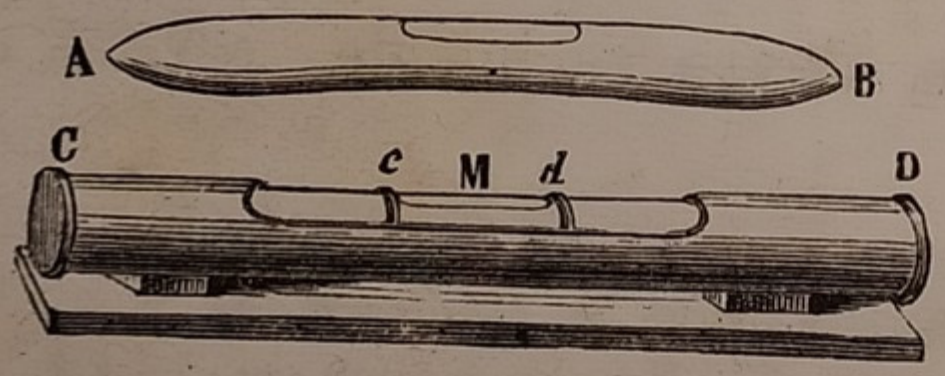


Fig. 95.

Se la livella è giusta, la bolla d'aria (M) specificamente più leggiera, occupa sempre la posizione più elevata, e quindi il mezzo (*cd*) alquanto elevato del tubo, quando lo strumento riposa su un piano orizzontale; invece sopra un piano inclinato si porta verso la parte più elevata del tubo e quindi del piano.

Dalla posizione della bollicina si può adunque riconoscere se un piano sia o no orizzontale, e da qual parte più elevato.

La livella a bolla d'aria si usa anche invece di quella ad acqua per fare le livellazioni; per ciò la si unisce ad un cannocchiale in modo che indichi quando l'asse ottico di quello è orizzontale.

§ 56. Determinazione del peso specifico.

1. Peso specifico dei corpi rispetto all'acqua. — Si disse (pag. 32) che si denomina: *peso specifico di un corpo: il peso dell'unità di volume*, e che questo si ottiene dividendo il peso del corpo pel suo volume, ovvero dividendo il peso di un corpo per il peso di un pari volume d'acqua distillata a + 4°.

Per avere il peso specifico di un corpo rispetto all'acqua debbonsi pertanto determinare due pesi, cioè:

1° il peso P del corpo,

2° il peso P′ di un pari volume d'acqua distillata, a + 4°,

e poi farne il quoziente.

2. Correzioni da farsi nella determinazione del peso specifico. — Siccome il volume dei corpi varia colla temperatura, così varia pure colla temperatura la densità ed il peso specifico dei medesimi.

Quindi la necessità di riferire la densità ed il peso specifico dei corpi ad una temperatura determinata. Si convenne di ridurre i risultati numerici che si trovano alla temperatura a cui si opera, al valore che avrebbero se i corpi fossero a 0°, e l'acqua distillata a + 4°, perchè è la temperatura della massima densità di questo liquido.

Tali riduzioni si fanno per mezzo di formole che somministra la teoria del calore.

Finalmente nelle esperienze precise conviene ancora tenere conto della perdita di peso che i corpi subiscono nell'aria come nei liquidi.

3. Metodi per determinare il peso specifico dei solidi e dei liquidi. — Il peso specifico dei solidi si può determinare con tre metodi, cioè: 1° colla bilancia idrostatica; 2° colla boccetta; 3° coll'areometro a volume costante.

4. Metodo della bilancia idrostatica per i solidi. — All'uncino del piatto della bilancia idrostatica si appende il corpo mediante un filo sottilissimo il cui peso sia trascurabile, e si stabilisce l'equilibrio nell'altro piatto mediante sabbia o migliarola. Indi si sostituiscono al corpo le unità di peso neces-

sarie per ristabilire l'equilibrio, e si ha così il peso P di esso, col metodo esatto detto della *tara* (pag. 146).

Poscia, tolti i pesi numerati e riattaccato il corpo all'uncino della bilancia, lo si fa immergere nell'acqua distillata di un vaso sottostante, e si determina la perdita apparente P′ di peso nell'acqua, rappresentata dai pesi da aggiungersi per avere nuovamente l'equilibrio, e la quale esprime il peso di un pari volume d'acqua.

Sarà $p = \frac{P}{P'}$ il peso specifico.

Conviene osservare che al corpo non rimangano aderenti bollicine d'aria, il che si ottiene immergendolo precedentemente nell'acqua distillata e strofinandolo con un delicato pennello.

L'esposto procedimento, eccellente in teoria, è tuttavia meno sicuro di quello che segue, detto della boccetta, perchè pei corpi solidi conviene prenderne un pezzo abbastanza grande, e non si è mai sicuri che non esistano nel loro interno cavità che ne diminuiscano il volume reale. Perciò è meglio operare con corpi ridotti in frammenti, il che richiede l'uso della boccetta.

5. Metodo della boccetta per i solidi. — Si prende una boccetta a collo largo, la cui bocca smerigliata può essere chiusa con precisione mediante un tappo pure smerigliato, e cavo, di vetro, che si prolunga in un tubo sottile (fig 96) e si dilata di nuovo in alto ad imbuto. Si riempie la boccetta di acqua, e vi si applica il tappo, nel quale il liquido si fa sollevare fino ad un'altezza determinata, segnata sul tubo sottile, sia aggiungendo acqua se ne manca, sia togliendone per l'imbuto l'eccesso mediante carta da filtro.

Fig. 96.

Indi si colloca su uno dei piatti d'una bilancia la boccetta piena d'acqua e il corpo di cui si cerca il peso specifico, e si fa la tara, cioè si equilibra il tutto mediante sabbia o migliarola che si pone sull'altro piatto.

Poi senza toccare la boccetta si toglie il corpo, e si sostituisce ad esso il peso P necessario per ristabilire l'equilibrio, che sarà il peso di quello.

Si leva quindi il peso P, e si introduce il corpo nella boccetta; così esso scaccia un volume d'acqua eguale al proprio, e rimesso il tutto sulla bilancia si cerca il peso P′ che ora si deve aggiungere sul piatto per ristabilire l'equilibrio, il quale è il peso dell'acqua spostata.

Infine il peso specifico è:

$$p = \frac{P}{P'}.$$

Il metodo serve anche pei corpi più leggieri dell'acqua perchè il tappo impedisce loro l'uscita dalla boccetta.

6. Metodo dell'areometro di Nicholson per i solidi. — Questo areometro (fig. 97) è costituito da un cilindro metallico cavo che serve da galleggiante, il quale inferiormente sostiene un cono massiccio col vertice in basso la cui base serve per posarvi il corpo di cui si vuol determinare il peso specifico. Superiormente il galleggiante porta un'asticina verticale, con un segno di affioramento, la quale termina con un piattino da bilancia. Su questo si collocano anzitutto tanti pesi quanti sono necessarii per far affiorare l'istrumento nell'acqua; poi vi si colloca anche il corpo togliendo tanti campioni P per riottenere l'affioramento; così evidentemente resta determinato il peso P del corpo, il quale infine si leva dal piattino per porlo sott'acqna posato sulla base del cono; i pesi che allora devonsi aggiungere sul piattino per avere da capo l'affioramento misurano il peso P′ di un pari volume d'acqua spostata; quindi

$$p = \frac{P}{P'}$$

sarà il peso specifico cercato.

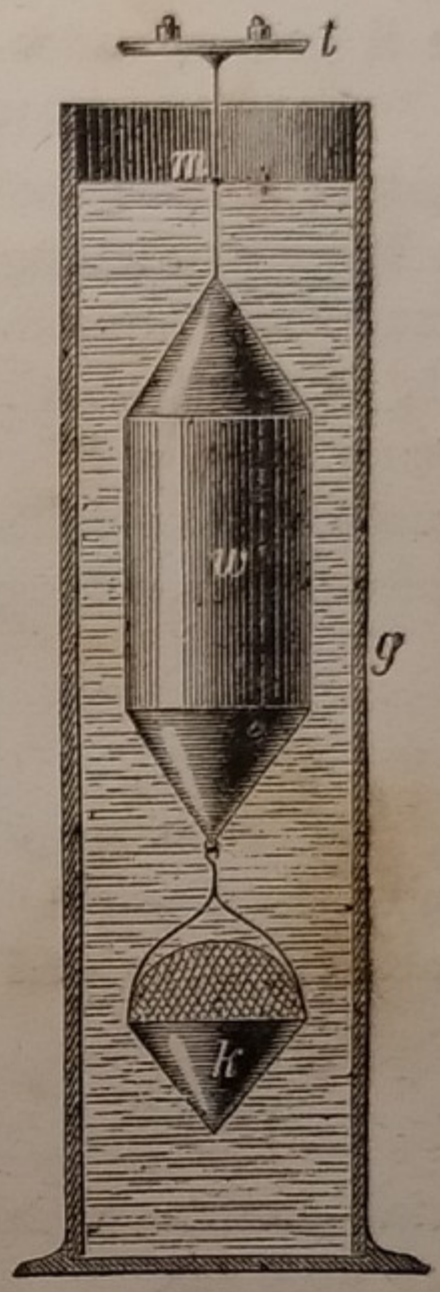


Fig. 97.

7. Metodo della bilancia idrostatica per i liquidi. — Si determina il peso specifico dei liquidi colla bilancia idrostatica mediante una sfera di platino, o una bolla di vetro ripiena di piombo, affinchè sia pesante, e possa immergersi anche nei liquidi piuttosto densi.

Si appende la bolla all'uncino della bilancia e le si fa equilibrio con una tara nell'altro piatto. Indi la si fa immergere nell'acqua, e si determina la sua *perdita di peso* P *in questa*, e poi si determina parimenti la *perdita di peso* P′ *nel liquido*, il peso specifico del quale sarà $\frac{P'}{P}$.

Fig. 98.

8. Metodo della boccetta per i liquidi. — Per questi si usa generalmente una boccetta come quella adottata da Regnault (fig. 98), che si prolunga superiormente in un cannello sottile munito di un segno, e termina in una dilatazione ad imbuto, la quale si può chiudere con un tappo di vetro smerigliato che impedisce l'evaporazione del liquido.

Si determina:

il peso P della boccetta vuota,
» P′ della boccetta piena di liquido fino al segno,
» P″ della boccetta piena d'acqua fino al segno.

Sarà $P' - P$ il peso del liquido contenuto nella boccetta;
» $P'' - P$ il peso dell'acqua contenuta nella boccetta;
e perciò

$$p = \frac{P' - P}{P'' - P}$$

è il peso specifico del liquido.

9. Metodo dell'areometro di Fahrenheit per i liquidi. — È un galleggiante di vetro che porta in basso una bollicina piena di migliarola o mercurio affinchè si mantenga ben verticale, ed in alto termina con un'asticina verticale, munita di un punto di affioramento e di un piattino. Sia F il suo peso, P i pesi da porsi sul piattino per ottenere il punto di affioramento nel liquido di peso specifico p, e P' quelli per produrre lo stesso effetto nell'acqua; allora siccome il peso dell'istrumento ed i pesi aggiunti pareggiano nei due casi il peso del liquido spostato avente sempre lo stesso volume, così si avrà:

$$p = \frac{F + P}{F + P'}.$$

10. Peso specifico dei gas. — Siccome un litro di aria secca a 0° pesa 1,293 *gr.*, e 1 litro di acqua a $+4°$ pesa 1000 *gr.*, consegue che il peso specifico dell'aria rispetto all'acqua è:

$$\frac{1{,}293}{1000} = 0{,}001293,$$

cioè è espresso da una frazione con sei cifre decimali. Analogamente per gli altri gas.

Quindi si scorge che il peso specifico dei gas rispetto all'acqua sarebbe espresso da frazioni con parecchie cifre decimali. Per evitare queste, il peso specifico dei gas si riferisce all'aria o all'idrogeno (che è il più leggiero di tutti), e il peso specifico di un gas si definisce: *il rapporto fra il peso di un determinato volume di gas e il peso di un pari volume di aria, o di idrogeno* (nelle stesse condizioni di temperatura e pressione).

Per determinarlo si cerca il peso di un litro dei diversi gas. A tale scopo si riempie un litro con acqua distillata a $+4°$, se ne determina il peso e poi da questo si sottrae 1 *kg.*, che è il peso dell'acqua, e così si ha il peso del recipiente perfettamente vuoto. Indi lo si riempie col gas di cui si vuole determinare il peso, lo si pesa di nuovo, e si sottrae da tale peso quello del recipiente. Il resto è il peso di un litro di quel gas.

Così 1 litro di idrogeno pesa 0,08936 *gr.*
» 1 » ossigeno » 1,4298 »
» 1 » aria » 1,293 »

Infine per avere il peso specifico del gas rispetto all'aria, basta fare il rapporto fra il peso di 1 litro di gas e quello di 1 litro d'aria.

Così il peso specifico dell'ossigeno rispetto all'aria è:

$$\frac{1{,}4298}{1{,}293} = 1{,}1055.$$

11. Tavola dei pesi specifici. — Nella seguente tabella sono inscritti i pesi specifici di parecchi corpi solidi e liquidi rispetto all'acqua, e di parecchi gas rispetto all'aria.

Solidi.

Platino (*secondochè è fuso, laminato, ecc.*) .	da	20,86	a	23,00
Oro	»	19,26	a	19,36
Piombo				11,35
Argento	»	10,47	a	10,59
Bismuto				9,82
Rame	»	8,79	a	8,88
Ottone (*lega di zinco e di rame*)	»	8,24	a	8,39
Ferro	»	7,21	a	7,79
Stagno				7,29
Zinco	»	6,86	a	7,17
Antimonio				6,72
Diamante	»	3,50	a	3,53
Flint (*vetro pesante a base di piombo*) . . .	»	3,20	a	3,78
Avorio				1,92
Ghiaccio fondente				0,92
Quercia (*secondochè è fresco o secco*) . . .	»	0,85	a	1,17
Abete	»	0,66	a	0,93
Sughero				0,24

Liquidi.

Mercurio				13,596
Acido solforico				1,841
Acido nitrico	da	1,217	a	1,520
Acido cloridrico	»	1,210	a	1,240
Acqua distillata a 0°	»	0,99987		
Acqua di mare				1,026
Olio d'oliva	»	0,815	a	0,915
Alcool assoluto	»	0,793	a	0,815
Etere	»	0,715	a	0,723

Gas.

Vapore di iodio	8,72
Cloro	2,45
Anidride carbonica (CO_2)	1,52
Ossigeno	1,10
Azoto	0,97
Ammoniaca (H_3N)	0,60
Vapor acqueo	0,62
Idrogeno	0,07

12. Uso delle tavole dei pesi specifici. — Avendo ogni corpo, a parità di temperatura e di struttura, un peso specifico particolare ed invariabile, questo è perciò un carattere per distinguerlo dagli altri, e per riconoscere la sua genuinità e purezza. Se, per es., si trova per un oggetto d'oro un peso specifico troppo grande, si deve congetturare che è mescolato con un metallo più pesante, come il platino; se invece lo si trova troppo piccolo, deve essere mescolato con sostanze più leggiere.

Il peso specifico serve pure a trovare il peso di un corpo che non si può mettere sulla bilancia. Si debba per es. conoscere il peso di una colonna di granito. Dapprima se ne determina geometricamente il volume, che sarà, per es., 2 metri cubi; poscia se ne prende un pezzettino e si determina il suo peso specifico. Sia per es., 2,8. Ciò vuol dire che ogni decimetro cubico pesa 2,8 *kg*. Quindi moltiplicando il volume 2000 per 2,8 il prodotto esprime il peso di quella massa di granito in *kg*.

Viceversa, se si conosce il peso totale P di un corpo ed il suo peso specifico p, cioè il peso dell'unità di volume, dividendo il primo pel secondo, se ne ottiene il volume, perchè $P = p\,V$ (pag. 33) e perciò $V = \frac{P}{p}$.

§ 57. Areometri, volumetri, densimetri e alcoolometro centesimale.

1. Areometri. — Chiamansi *areometri a peso costante:* stromenti costituiti da un cannello (A C, fig. 99) di vetro, chiuso in alto, nell'interno del quale vi è una listerella di carta graduata, e unito inferiormente a due dilatazioni o bolle, una superiore (C), che serve a dare allo stromento la necessaria leggerezza affinchè galleggi nei liquidi, e l'altra inferiore (*d*) più piccola, contenente mercurio o migliarola, che serve di zavorra per dare allo stromento equilibrio stabile nei liquidi (pag. 64).

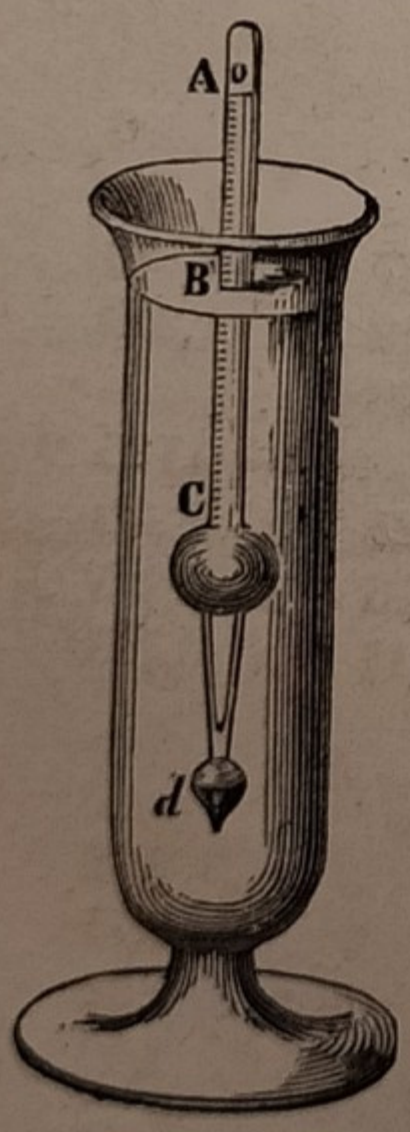


Fig. 99.

Essi si affondano più o meno in questi secondochè sono meno o più densi, cosicchè dal grado di affondamento si può giudicare la concentrazione dei liquidi.

Servono ai farmacisti, droghieri, liquoristi, enologi e fabbricanti di prodotti chimici (acidi, ecc.), per conoscere quando i liquidi che essi preparano hanno il grado di concentrazione che la pratica ha dimostrato conveniente.

Se ne costruiscono di due sorta, cioè: pei liquidi più densi dell'acqua, che diconsi anche *pesa-acidi*, o *pesa-sali*, e pei liquidi meno densi che l'acqua, i quali diconsi anche *pesa-liquori*.

Quelli più in uso sono detti di Baumé.

2. Areometro Baumé. — L'areometro di Baumé, destinato ai liquidi più densi dell'acqua, siccome le soluzioni saline, gli sciroppi, gli acidi, è zavorrato in modo che in quella si affonda fino ad un punto collocato alla sommità del cannello, ove si segna 0°.

Poi per fare la graduazione si fa una soluzione di 15 parti in peso di sale di cucina in 85 parti d'acqua. Essendo tale soluzione più densa dell'acqua pura, l'areometro vi si immerge d'una quantità minore, cioè solo fino ad un altro punto ove si nota 15°. L'intervallo fra 0° e 15° si divide in 15 parti eguali, e si prolunga la divisione fino all'estremità inferiore del cannello. Così è compiuta la graduazione che si segna sovra la listerella di carta posta nell'interno del tubo.

Per i liquidi meno densi dell'acqua, come gli alcoli, essenze, ecc. Baumé costruì un altro areometro zavorrato in modo che in una soluzione di 10 parti di sal marino in 90 parti di acqua, alla temperatura di 12°,5, si immergesse fino alla base inferiore del cannello, ed ivi segnò 0°. Indi lo immerse nell'acqua pura, ed al nuovo punto di affioramento segnò 10°. Divise l'intervallo in 10 parti eguali e prolungò la graduazione in alto, fino a circa 50°. Oggidì si sopprimono come inutili le prime 10 divisioni, e perciò la scala comincia al decimo grado, punto di affioramento nell'acqua.

Talvolta questi due areometri sono riuniti in uno solo portante le due scale, l'una *discendente* per liquidi più densi, e l'altra *ascendente* pei liquidi meno densi dell'acqua.

3. Indicazioni degli areometri Baumé. — Come si vede queste graduazioni degli areometri Baumé sono puramente convenzionali ed empiriche, cosicchè non servono a fare conoscere le densità dei liquidi rispetto all'acqua, nè le proporzioni dei componenti dei medesimi; tuttavia essi permettono di conoscere quando i liquidi che si preparano in diverse industrie posseggono il grado di concentrazione richiesta dalla pratica.

Per es., l'areometro Baumé pei liquidi più densi dell'acqua immerso

nell'acido	solforico	concentrato	($H_2SO_4 + H_2O$)	segna 66°,
»	nitrico	»	(HNO_3)	» 43°,
»	cloridrico	»	(HCl)	» 26°,

quindi esso serve ai fabbricanti di acidi per conoscere se questi posseggono quel certo grado di concentrazione. Parimente serve ai fabbricanti di sciroppi, perchè in un sciroppo ben confezionato il detto areometro segna 36° a freddo.

E l'areometro pei liquidi meno densi dell'acqua segna 36° nell'alcool del commercio, 56° nell'etere, ecc.

4. Areometri speciali pei diversi liquidi. — Di più si costruiscono areometri speciali pei diversi liquidi, detti *pesa etere*, *pesa olio*, *pesa mosto* *pesa birra*, *pesa latte* o *galattometri*, ecc.

5. Volumetri. — Questi sono areometri i quali danno il rapporto dei volumi di pesi eguali di vari liquidi. Se sono semplicemente cilindrici basta segnare 100 al punto di affioramento nell'acqua e dividere la porzione sommersa in 100 parti eguali. Quando in un altro liquido segnano *n* divisioni,

vuol dire che essendo v il volume di una divisione, un volume nv di quel liquido pesa quanto un volume 100 v di acqua, e perciò rappresentando con p il peso specifico del liquido, si ha:

$$nvp = 100\,v, \qquad \text{ossia} \qquad np = 100,$$

e quindi

$$p = \frac{100}{n}.$$

Dunque: *per determinare il peso specifico di un liquido col volumetro, basta dividere* 100 *per il numero segnato al punto di affioramento in quel liquido.*

Se l'istromento non è tutto cilindrico, ma è munito in basso di una o due bolle, come quello rappresentato dalla fig. 99, si fa la graduazione prima di chiuderlo in alto regolando la zavorra per modo che immerso nell'acqua affiori solo fino al principio del cannello C A, e ivi, cioè in C, si segna 50. Indi si aggiunge altra zavorra fino a raddoppiare il peso; allora immerso nell'acqua ne sposta un volume doppio, e nel nuovo punto di affioramento si segna 100. Si divide l'intervallo in 50 parti e si prolunga la divisione sopra il 100. Così lo stromento può servire tanto pei liquidi più densi, quanto per quelli meno densi dell'acqua.

6. Densimetri. — Questi differiscono dal volumetro solo perchè in corrispondenza delle divisioni sono scritti direttamente i numeri che danno i pesi specifici, i quali si ottengono dalla formola $p = 100/n$.

In tali stromenti le divisioni corrispondenti ad eguali differenze di densità non possono essere ad eguali distanze.

7. Alcoolometro centesimale di Gay-Lussac. — Gli alcoli del commercio, o spiriti, non sono costituiti da alcool puro, ma sono mescolanze di questo liquido con acqua, ed importa assai, sia pel commercio, sia per i dazi che si impongono a tali liquidi, di potere conoscere nel modo più semplice e spedito la quantità di alcool puro che essi contengono.

Ciò si ottiene mediante un areometro denominato *alcoolometro centesimale*, col quale si determina quante parti, in volume, di alcool assoluto, sono contenute in 100 volumi di acquavite o spirito del commercio.

Per graduarlo si versano in una serie di vasi cilindrici

100, 90, 80 . . . . . 20, 10, ecc. $cm.^3$

di alcool puro, aggiungendo in ciascuno tanta acqua da costituire un miscuglio costantemente di 100 $cm.^3$ (*). Ai punti corrispondenti di affioramento dello strumento nei detti miscugli si segnano i numeri:

100, 90, 80, ... 20, 10, ecc.,

e ciascuno di questi intervalli si divide in 10 parti eguali.

(*) A tale scopo debbonsi, per esempio, ai 10 $cm.^3$ di alcool puro aggiungere più di 90 cm^3 d'acqua, perchè nella mescolanza di questa coll'alcool avviene contrazione di volume.

Anche in questo caso, come negli altri areometri, le divisioni della scala, corrispondenti a numeri equidistanti, hanno lunghezze diverse.

L'alcoolometro centesimale di Gay-Lussac è adottato in Francia per legge del 4 giugno 1881.

Quando poi si ha un alcoolometro campione già graduato, per costruirne altri basta immergerli con quello in due soluzioni alcooliche qualunque e segnare i punti corrispondenti di affioramento, poi dividere l'intervallo in parti proporzionali alle divisioni delle scale dell'alcoolometro campione.

8. Correzione per la temperatura. — Perchè i risultati degli alcoolometri siano comparabili bisogna tenere conto della temperatura, da cui dipende la densità dei liquidi. Gay-Lussac ha adottato quella media di 15°, alla quale soltanto le loro indicazioni sono precise. Ma egli ha costruita una tavola di correzione, mediante la quale, conoscendo la temperatura e l'indicazione dell'alcoolometro, si può riconoscere esattamente la proporzione dell'alcool.

Questa tavola contiene in una colonna verticale le temperature da 0° a 30°, ed in una linea orizzontale i gradi dell'alcoolometro da 0° a 100°. In essa, come nella tavola pitagorica di moltiplicazione, si trova il numero che indica la ricchezza del liquido alcoolico, nel punto d'incontro della colonna verticale, che ha in alto il grado segnato dall'alcoolometro, colla linea orizzontale che ha di fianco il grado della temperatura. Per es. se in un dato miscuglio di acqua ed alcool l'alcoolometro indica 36° alla temperatura 22°, nella tavola si trova che la ricchezza reale di questo liquido, ridotta alla temperatura di 15°, è 33, cioè che contiene $^{33}/_{100}$ del suo volume di alcool.

9. Misura dell'alcool contenuto nel vino. — L'alcoolometro serve solo pei miscugli di alcool e acqua e non per quelli che contengono altre sostanze. Per es., esso non potrebbe servire per misurare direttamente la quantità dell'alcool contenuta nel vino, perchè questo contiene ancora sostanze minerali e coloranti.

Per conoscere la proporzione dell'alcool nel vino se ne prende un certo volume e si distilla condensandone il vapore. Quando si è raccolto il terzo del volume primitivo, tutto l'alcool del vino è evaporato; quindi si arresta la distillazione, e il prodotto di essa si allunga con acqua in modo da ricostituire il volume primitivo del vino. Allora nel miscuglio si può immergere l'alcoolometro che farà conoscere la proporzione dell'alcool in quel vino.

§ 58. Adesione fra i solidi e i liquidi.

1. Fenomeni di adesione fra i solidi e i liquidi. — Ognuno sa che immergendo il dito, o un pezzo di carta, o di vetro, ecc., nell'acqua, e poi sollevando i detti corpi, questi rimangono ba-

gnati, cioè delle goccie liquide restano attaccate ai medesimi. Invece se si ripete l'esperienza col mercurio, non rimangono goccie liquide aderenti ai detti corpi, cioè questo liquido non li bagna.

2. Causa. — Evidentemente adunque, un solido è bagnato o no da un liquido secondochè la sua adesione per questo è maggiore o minore della coesione del liquido.

3. Altri effetti. — Se poi si mette una goccia d'acqua su un piatto di maiolica, si vede che la goccia si espande; invece se si mette la goccia sur un piatto di maiolica coperto di nero fumo, si vede che la goccia non si espande, ma si riduce in un globetto; perchè l'adesione dell'acqua per la maiolica è maggiore della sua coesione, ed invece l'adesione dell'acqua pel nero fumo è minore della sua coesione. Parimenti una goccia di mercurio si espande su una foglia di stagno pulita, ed invece si riduce in un globetto sulla maiolica, sul vetro, sulla carta, sul legno, come pure sui metalli non sciolti dal mercurio, come il ferro.

Un solido si scioglie in un liquido quando l'adesione di questo per quello ne vince la coesione.

§ 59. Diffusione, diosmosi e dialisi dei liquidi.

1. Fenomeni di diffusione. — Il vino, in generale (*), galleggia sull'acqua perchè specificamente più leggiero. Perciò si può avere uno strato di vino galleggiante sull'acqua, sia versandolo lentamente su di un pezzo di pane o di sughero galleggiante, sia immergendo al fondo di un alto bicchiere d'acqua una boccettina piena di vino. Si vede in quest'ultimo caso uscire dalla boccetta una corrente di vino che sale alla superficie dell'acqua e forma uno strato distinto da questa. Ma anche lasciando i due liquidi in perfetto riposo, dopo uno o due giorni si veggono mescolati, cioè le molecole del vino, quantunque più leggiere, sono discese fra quelle dell'acqua, e viceversa le molecole di questa, quantunque più pesanti, si sono elevate fra quelle del vino.

(*) Vi sono anche vini legittimi più pesanti che l'acqua, per es. quelli dolci che contengono ancora lo zucchero dell'uva.

Tale fenomeno della mescolanza reciproca di due liquidi di diversa densità si dice *diffusione dei liquidi.*

Se si mette in un bicchiere un poco di sale di cucina, e poi vi si versa sopra dell'acqua, dopo qualche tempo si trova che tutto il liquido è salato, perchè il sale si scioglie e poi si diffonde nell'acqua.

Altro esempio di diffusione si ha mettendo in un bicchiere profondo tintura di viole o di tornasole, e poi versando in un tubo di vetro, pescante fino a fondo del liquido, alquanto acido solforico, o meglio cloridrico, il quale arrossa immediatamente il liquido nel fondo, e poscia, poco per volta, tutto quello contenuto nel bicchiere.

Così pure se in un bicchiere si mettono sali colorati, come il solfato di rame o il bicromato potassico, e poi si versa sopra dell'acqua, avverrà dapprima la soluzione dei detti sali negli strati inferiori; ma poi le loro molecole passeranno lentamente negli strati superiori finchè l'intera colonna liquida avrà la stessa composizione in tutti i punti. Ciò potrà richiedere giorni, o settimane, o mesi, secondo la natura dei liquidi e dei solidi, e la temperatura, se i liquidi sono tranquilli, mentre quando vengono agitati la mescolanza si compie in pochi secondi, perchè allora diviene maggiore la superficie di contatto, e quella è favorita dallo scuotimento.

2. Causa della diffusione. — Il fenomeno della diffusione prova che le molecole dei liquidi non sono in quiete, ma si muovono, se no non potrebbero penetrare le une fra le altre.

Però questo non avviene per tutti i liquidi, ma solo fra quelli la cui adesione è maggiore della loro coesione. Per es., l'acqua e l'olio non si mescolano, come pure l'acqua e il mercurio.

3. Velocità della diffusione. — In generale i liquidi si diffondono gli uni negli altri, ma con diversa celerità. Secondo Graham,

se l'acido cloridrico si diffonde nell'acqua in	1 giorno,
il cloruro sodico, a parità di condizioni, ne richiede	2 + 1/3,
il solfato di magnesio e lo zucchero cristallizzato	7,
l'albumina	49,
e lo zucchero bruciato o caramello	98.

La diversa celerità della diffusione varia colla temperatura.

4. Cristalloidi e colloidi. — Come l'albumina e lo zucchero bruciato, sono pure lenti nel diffondersi l'idrato silicico, gli idrati d'allumina, le gomme, la colla, ed in generale i corpi che non cristallizzano, ma che assumono consistenza gelatinosa, come la colla, i quali si dicono perciò *colloidi*, mentre si diffondono celeremente i corpi capaci di cristallizzare i quali chiamansi *cristalloidi*.

5. Diosmosi dei liquidi. — Se si lega ad un cannello di vetro un pezzo di vescica in modo che ne risulti una specie di borsa o sacco (fig. 100), e poi si versa dentro al cannello un liquido colorato, per es., una soluzione di solfato di rame nell'acqua, che ha colore azzurro, ed infine si immerge il sacco nell'acqua di un recipiente, in modo che questa non arrivi alla legatura, e si nota il livello del liquido nel cannello, dopo alcune ore si vede nel medesimo un sollevamento di parecchi centimetri, mentre l'acqua esterna ha acquistato anch'essa una leggera colorazione azzurra.

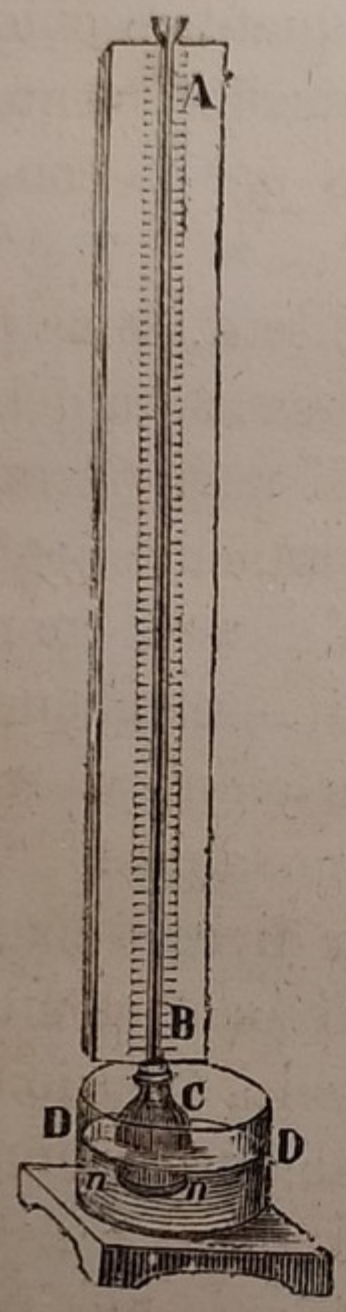


Fig. 100.

Questa colorazione prova che la soluzione azzurra di solfato di rame contenuta nell'interno del sacco ha attraversato la parete permeabile della vescica ed è venuta fuori, mentre il sollevamento del liquido nel cannello dimostra che l'acqua esterna è penetrata nell'interno del sacco membranoso, ma in maggior copia che non ne sia uscito il liquido interno.

Lo stesso avviene ponendo nel recipiente una soluzione di zucchero, o di sal di cucina, ovvero dell'alcoole, e fuori dell'acqua; in capo a 24 ore il liquido nel tubo si è sollevato parecchi centimetri. Se si ponesse acqua nell'interno del recipiente e i detti liquidi all'esterno, avverrebbe abbassamento nel tubo, cioè passerebbe più liquido dall'interno all'esterno che non viceversa.

Adoperando altri liquidi, per es., latte, od altre membrane o pareti porose, purchè esse siano permeabili ed i liquidi suscettibili di mescolarsi, si osserva sempre lo stesso fenomeno, cioè, in generale, due liquidi diversi, quando sono separati da una parete permeabile, attraversano questa e si diffondono l'uno nell'altro, ma con diversa celerità.

Tale fenomeno, assai importante nel regno organico, vegetale e animale, si dice *diosmosi*, e si distingue ancora col nome di *endosmosi* la corrente del liquido esterno verso l'interno, ed *esosmosi* la corrente del liquido interno verso l'esterno.

Perchè vi sia endosmosi bisogna: 1° che i liquidi sieno eterogenei e suscettibili di mescolarsi; laonde non vi è endosmosi per es., fra l'acqua e l'olio; 2° che la parete che li separa sia permeabile ad uno almeno di essi; perciò non vi sarebbe endosmosi con una parete di vetro.

Le sostanze vegetali ed animali sono tutte permeabili, epperciò permettono tutte l'endosmosi, ma esse si alterano. Colle sostanze inorganiche permeabili, siccome la grafite, il grès, la porcellana e la maiolica porosa, la terra da pipe, l'endosmosi può durare indefinitamente.

6. La diosmosi nel regno organico. — Il fenomeno della diosmosi avviene di continuo nei vegetali e negli animali. Infatti è per endosmosi che l'acqua piovana, colle sostanze che tiene in soluzione, penetra nelle fibrille delle radici delle piante, come pure nelle foglie e nei frutti, e che i succhi si raccolgono di preferenza in certe parti dei vegetali.

Il cibo degli animali passa successivamente dalla bocca nello stomaco e poi negli intestini; ivi ha l'aspetto di un liquido biancastro detto *chilo*, il quale penetra per endosmosi nei vasi chiliferi, che lo portano in circolazione nel sangue.

Se l'*epidermide*, cioè lo strato più esterno della pelle che riveste il nostro corpo, è lacerata in qualche punto, in guisa che siano scoperti i canaletti più sottili in cui circola il sangue, detti *vasi capillari*, devesi evitare che essi vengano in contatto cogli umori di qualche piaga, perchè questi penetrerebbero per endosmosi nei medesimi e infetterebbero tutto il sangue. Si evita tale pericolo ungendo la pelle di materia grassa, per esempio di olio.

Molti infusorii, animali microscopici contenuti nell'acqua, consistono semplicemente in un sacco membranoso, nel cui interno penetra l'alimento per endosmosi. Così pure si sviluppano i semi delle piante.

7. Dialisi. — Se si versa acqua in un miscuglio di gomma e zucchero questo si eleva nell'acqua lasciando in basso la gomma. La separazione avviene ancora meglio versando il miscuglio in un cilindro di vetro chiuso inferiormente da una lamina di vescica, o di carta pergamena (*), e poi immergendo il recipiente così costituito in un vaso più grande contenente acqua.

(*) Dicesi *carta pergamena* la carta da filtro ridotta ad avere tenacità e consistenza come la pergamena. Per prepararla si pone la carta per pochi secondi a contatto con l'acido solforico poco diluito, poscia si lava nell'acqua, e si fa asciugare.

Il processo della separazione di una sostanza capace di diffondersi, o cristalloide, da un'altra poco o punto capace di diffusione, o colloide, chiamasi *dialisi*, e l'apparecchio descritto denominasi *dializzatore*.

Esso viene applicato all'industria. Per es.: la melassa di barbabietole è un miscuglio di zucchero cristallizzabile e di parecchi sali organici e minerali disciolti; allorchè essa è messa nel dializzatore immerso nell'acqua pura, i sali passano molto più rapidamente dello zucchero al di fuori, mentre l'acqua penetra nell'interno, e a capo di qualche tempo la soluzione zuccherina è sbarazzata di quei sali, e può dare zucchero puro per cristalizzazione.

§ 60. Forma della superficie libera dei liquidi in vicinanza delle pareti dei recipienti.

1. Osservazioni. — Se si osserva la superficie dell'acqua, o del vino, in un bicchiere, si vede che in vicinanza della parete essa si solleva verso questa e diviene concava. Invece la superficie del mercurio in vicinanza del vetro si deprime e diviene convessa.

Infine può anche avvenire che la superficie del liquido in contatto del solido rimanga piana. Tale è il caso dell'acqua in contatto dell'acciaio levigato, della ceralacca e del vetro unto, e del mercurio mescolato con ossido mercurico in contatto del vetro.

2. Legge. — In generale *la superficie di un liquido in contatto di un solido si solleva verso questo e diviene concava, ovvero si deprime e diviene convessa, secondochè il liquido bagna o no il solido, ossia secondochè l'adesione fra il liquido e il solido è maggiore o minore della coesione del liquido. Infine il rapporto fra la coesione e l'adesione può anche essere tale che la superficie del liquido rimanga piana.*

3. Causa del sollevamento e della depressione dei liquidi in contatto dei solidi. — Nel caso dell'acqua in contatto del vetro una molecola in vicinanza della parete è sotto l'azione di 3 forze, cioè della gravità che ha direzione verticale, della coesione diretta verso il liquido e dell'adesione diretta perpendicolarmente alla parete. Di queste tre forze la maggiore è la terza, perchè l'adesione supera la coesione, e questa è maggiore della

gravità. Perciò la loro risultante è diretta verso la parete. Ora pel teorema che: *la superficie libera di un liquido in equilibrio è in ciascun punto perpendicolare alla direzione della risultante delle forze che agiscono sulle sue molecole*, la detta superficie in vicinanza della parete deve essere perpendicolare ad una retta inclinata verso questa, il che richiede il suo sollevamento verso la parete stessa.

Il contrario avviene pel mercurio.

Infine se la risultante delle dette 3 forze è verticale, allora la superficie libera del liquido anche in contatto della parete rimane orizzontale.

§ 61. Contrattilità delle lamine liquide curve.

1. Esperienza delle bolle di sapone. — Se si gonfia una bolla di sapone con un cannello, e poi la si tiene sospesa all'estremità inferiore del medesimo, si vede quella diminuire di diametro tanto più rapidamente, quanto minore è questo. Accostando la bocca superiore del cannello alla faccia, si sente il soffio della corrente d'aria che ne esce, e se la si rivolge verso una fiamma, la si vede piegarsi. Gonfiando la bocca con fumo di sigaro, di cui si sia fatta una provvista in bocca, si vede una corrente di fumo uscire dal cannello. Infine se si tura l'estremità aperta di esso, sì che il gas non possa uscire, cessa la contrazione della bolla.

2. Contrattilità delle lamine liquide curve. — La precedente esperienza dimostra che *le lamine liquide curve posseggono una contrattilità la quale cresce col crescere della loro curvatura.*

3. Causa della contrattilità delle lamine liquide curve. — Per spiegare la contrattilità delle lamine liquide curve, si deve osservare che se M, M′, M″ (fig. 101) sono 3 molecole contigue di una lamina liquida curva, le due forze attrattive che le molecole laterali M, M″ esercitano sulla molecola mediana M′ danno luogo ad una risultante M′R diretta verso il centro, la quale va crescendo col diminuire dell'angolo M M′ M″, cioè col crescere della curvatura della lamina o col diminuire del suo raggio.

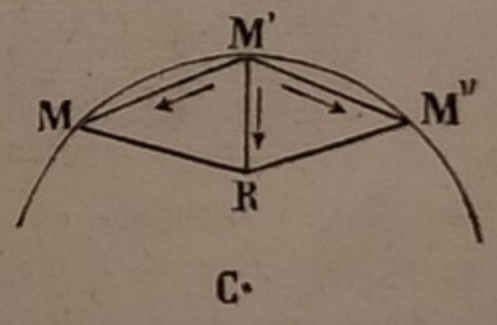


Fig. 101.

Dunque una lamina liquida curva tende a contrarsi perchè le sue molecole tendono ad avvicinarsi al centro della curvatura della lamina.

Ed in generale, quando le molecole dei liquidi sono disposte in linea curva, la coesione dà luogo ad una risultante che tende ad avvicinare le molecole al centro della curva, la quale è tanto maggiore quanto è maggiore la curvatura, o quanto minore è il raggio della curva, ed inversamente.

4. Fenomeni dipendenti dalla contrattilità delle lamine liquide. — Se si immerge nell'acqua saponata un anello di filo di ferro munito di un gambo, e poi lo si estrae, rimane nell'anello una lamina liquida, la quale assume la forma di una borsa quando vi si soffia contro, ma poi al cessare del soffio ritorna piana.

Se a due punti dell'anello si lega un filo pieghevolissimo, e poi da una parte di questo si lacera la lamina traversandola con un pezzo di carta da filtro, si vede l'altra parte della lamina rimasta intatta contrarsi il più possibile e dare al filo una curvatura circolare.

Se poi si colloca sulla lamina un filo i cui due capi sono congiunti e la cui lunghezza è minore della circonferenza dell'anello, indi si lacera la lamina liquida nell' interno del filo, si vede che la parte rimanente della lamina circostante al filo lo tende circolarmente.

§ 62. Sollevamento o depressione dei liquidi negli spazi capillari.

1. Osservazioni e leggi. — Si dicono *tubi* o *spazi capillari* quelli di piccolo diametro (dal latino *capillus*, capello).

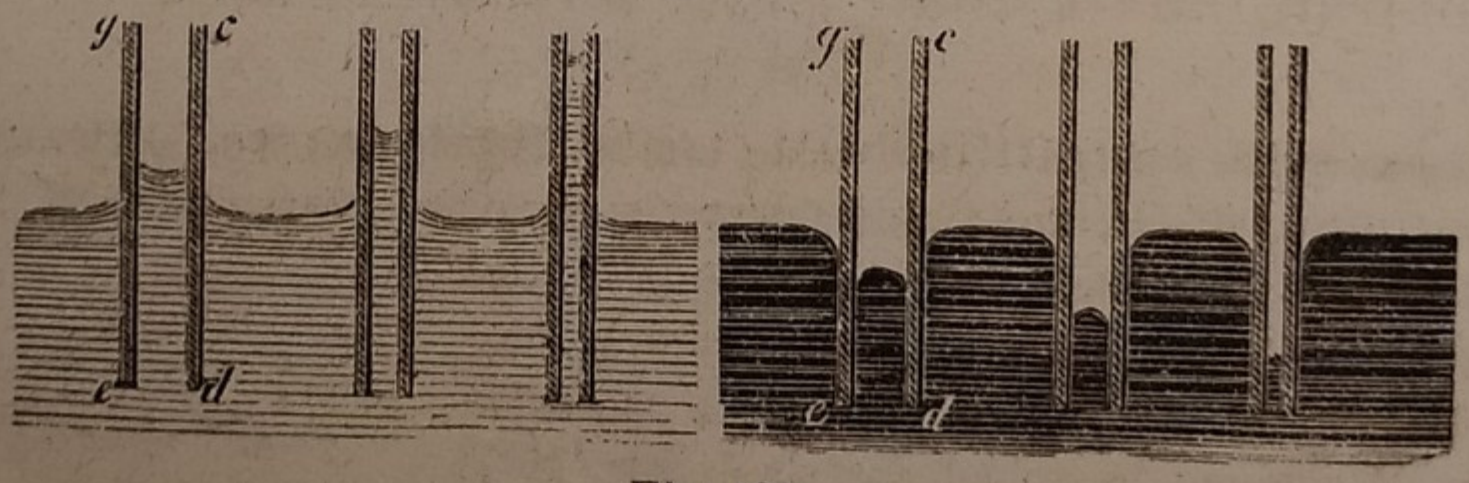


Fig. 102.

Ora se si immergono, per es., 3 tubi capillari di diametro decrescente nell'acqua, e altrettanti nel mercurio (fig. 102), oppure si versano gli stessi liquidi in tubi comunicanti aventi un ramo capillare e l'altro no (fig. 103), si osservano i seguenti fenomeni:

1° *Se il liquido bagna il tubo esso vi si solleva al di sopra del livello che ha nel tubo, o recipiente, di maggior dia-*

metro, ed è terminato da una superficie concava, che si dice *menisco concavo* (*meniscos*, piccola luna). *Se invece il liquido non bagna il tubo, esso si deprime, ed è terminato da una superficie, o menisco convesso.*

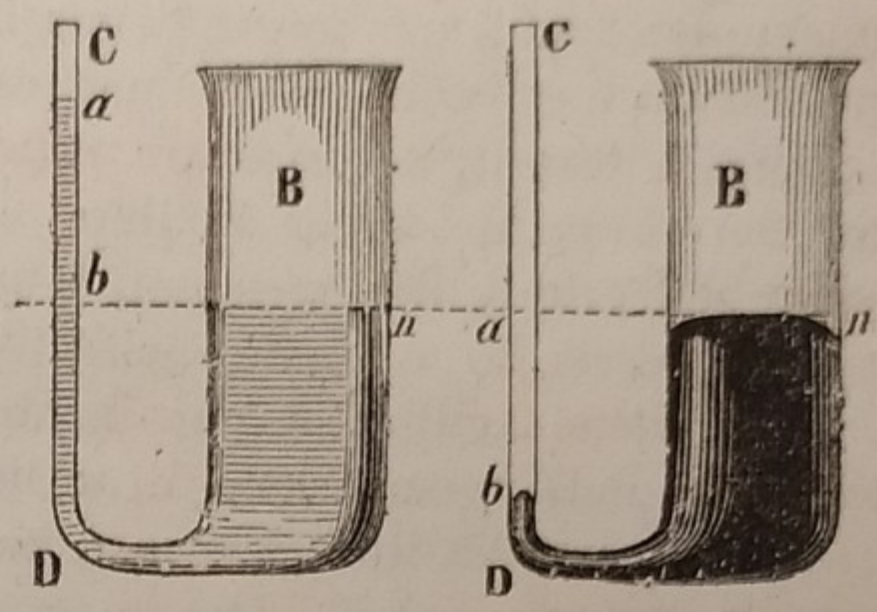


Fig. 103.

2° *L'innalzamento e la depressione variano colla natura dei liquidi e con la temperatura.*

3° *Per uno stesso liquido e una stessa temperatura l'innalzamento e la depressione sono in ragione inversa dei diametri dei tubi.*

2. Condizioni per l'osservazione dei fenomeni capillari. — Perchè detti fenomeni si verifichino bene, conviene che le superfici di vetro sieno ben pulite. A tale scopo si lavano prima con una soluzione di potassa nell'acqua, poi con acido nitrico, indi con acqua ed infine debbono essere precedentemente immerse nel liquido su cui si esperimenta.

3. Causa del sollevamento e della depressione dei liquidi negli spazi capillari. — Quando il liquido bagna il tubo, come avviene per l'acqua col vetro, la colonna liquida nel cannello è terminata da un menisco concavo, le cui molecole tendono ad avvicinarsi al centro del medesimo collocato in alto, tanto più energicamente quanto è maggiore la curvatura. Quindi nell'interno del cannello riesce diminuita la pressione idrostatica, e la pressione esterna fa sollevare una colonna liquida, finchè questa col suo peso compensi il difetto di pressione dall'alto in basso che esiste nell'interno del cannello per effetto del menisco concavo.

Il contrario avviene nel caso di un menisco convesso.

4. Fenomeni dipendenti dalla capillarità. — La proprietà dei piccoli spazi di sollevare i liquidi mediante l'azione dei menischi concavi dicesi *attrazione*, o *assorbimento capillare*.

L'attrazione capillare spiega: il salire del caffè in un pezzo di zucchero parzialmente immerso in tal liquido, del vino in un biscotto, dell'umidità nei pavimenti, nei muri (muri del salnitro), nei mucchi di sabbia, il trapelamento nei vasi porosi (vasi porosi delle pile, alkarazzas, tubi del drenaggio), l'assorbimento dei liquidi operato dalle spugne, dalla carta asciugante (senza colla), dalle stoffe, dall'humus, dalla pelle umana (donde l'utilità dei bagni), e concorre coll'endosmosi a produrre il sollevamento della linfa nei vasi delle piante, come anche il movimento dei liquidi nel corpo degli animali.

Si utilizza l'assorbimento capillare negli stoppini delle lampade, nei quali il liquido combustibile si solleva fino alla fiamma; nello spaccare le

roccie con cunei di legno inumidito; nell'incurvamento o raddrizzamento del legno mediante l'acqua da una parte e il calore dall'altra; nello spaccamento dei cranii per mezzo di piselli inumiditi; nel rigonfiamento e accorciamento dei panni e delle funi (obelisco del Luxor, obelisco di piazza S. Pietro a Roma); nel riparare recipienti di legno fessurato coll'inumidirli con acqua; nel sifone capillare che è un pezzo di stoffa che si pone a cavallo dell'orlo di due recipienti, e pescando nel liquido contenuto in uno, goccia a goccia, lo fa passare nell'altro.

L'attrazione capillare è pure la causa dell'assorbimento e dell'imbibizione, cioè della penetrazione di un liquido nei pori di un solido.

Così la carta da filtro, che non ha i pori ostruiti dalla colla come la carta da scrivere, assorbe l'acqua e l'inchiostro, e se ne imbibisce. La sabbia, la cenere, la segatura di legno, assorbono i liquidi acquosi e se ne imbevono.

Capitolo IV.

MECCANICA SPECIALE DEGLI AERIFORMI O AEROMECCANICA

§ 63. Carattere e costituzione dei gas.

1. Pneumatica. — Con tal nome si distingue la parte della Fisica che tratta delle proprietà meccaniche speciali dei corpi aeriformi.

2. Gas e vapori. — Gli aeriformi si distinguono in *gas* e *vapori*. Quelli esistono allo stato aeriforme all'ordinaria temperatura, come l'aria, l'ossigeno, l'azoto, l'idrogeno, il gas luce, ecc. Invece col nome di *vapori* si comprendono i corpi aeriformi che nascono dal riscaldamento dei liquidi, siccome il vapore acqueo che si sviluppa col riscaldamento dell'acqua. Notisi però che questo è affatto invisibile come l'aria, e che il fumo sollevantesi da una caldaia in ebollizione, il quale costituisce anche la nebbia e le nubi, non è vapore, ma una riunione di piccolissime goccioline d'acqua liquida.

3. Caratteri dei corpi aeriformi. — Parlando dei tre stati di aggregazione si è già notato essere proprietà caratteristica degli aeriformi la tendenza ad espandersi, la quale si manifesta all'occhio nell'aria mista a fumo che esce da un camino, nel vapore acqueo che esce dalla caldaia di una macchina a vapore, ecc. Così pure una vescica avvizzita ed ermeticamente chiusa alla sua bocca si gonfia per l'espansione dell'aria interna quando si col-

loca sotto una campana e si diminuisce la pressione esterna rarefacendo l'aria in quella.

Per tale proprietà i corpi gazosi tendono ad occupare un volume sempre maggiore, e si espanderebbero indefinitamente se non vi si opponessero forze esterne.

4. Teoria cinetica sulla costituzione dei gas. — L'espansività dei gas è dunque un fàtto sperimentale e si interpreta colla ipotesi enunciata per la prima volta da Daniele Bernouilli, ammettendo che le loro molecole non sono in quiete, ma sono dotate di moto progressivo, cioè che si muovono in linea retta finchè non incontrano un'altra molecola o la superficie di un corpo che le fa deviare dalla loro direzione.

Le molecole dei gas quindi, o si urtano continuamente a vicenda, od urtano le superfici dei corpi con cui sono in contatto, e da tali urti nascono le pressioni che essi esercitano sulle superfici stesse.

5. Velocità molecolari dei gas. — Anzi mediante l'esperienza e il calcolo si sono determinate le velocità di tali movimenti progressivi che posseggono le molecole dei diversi gas, e si è trovato che, il gas idrogeno, il quale è il meno denso, ha la massima velocità molecolare, la quale arriva a 1843 *m.* per secondo, a 0° C. Però le sue molecole non percorrono spazi in linea retta, ma bensì in linea spezzata, perchè vengono deviate dalla loro direzione per il loro incontro con un'altra, appena hanno percorso una piccolissima frazione di millimetro.

Secondo Clerk-Maxwell, in una massa d'idrogeno alla temperatura e pressione ordinaria, ogni particella subisce in media 17 700 000 000 urti per secondo, cioè il suo cammino è mutato il detto numero di volte per secondo. Per le particelle dell'aria il numero degli urti per secondo non è che circa $^1/_4$ di quello dell'idrogeno.

§ 64. Trasmissione delle pressioni nei gas.

1. Esperienze ed osservazioni. — Quando si soffia una bolla di sapone si esercita una pressione nella direzione del cannello sull'aria contenuta nella medesima, e siccome essa si gonfia sfe-

ricamente si deve concludere che la pressione esercitata nella direzione del cannello si trasmette egualmente in tutte le direzioni.

Nell'esperienza della sfera cava, già usata pei liquidi, ai diversi punti della cui superficie sono applicati dei cannelli ricurvi ad U in cui si mette acqua colorata, se invece di riempiere anche la sfera con acqua, si lascia aria nella medesima, e poi si preme questa nel tubo sovrastante, col pollice o con uno stantuffo, si vede il liquido sollevarsi in ciascun cannello.

2. Il principio di Pascal nei gas. — Quindi si deve concludere che il principio di Pascal si verifica nei gas come nei liquidi. Anzi siccome le molecole di quelli sono più libere di quelle dei liquidi, essendo in essi minore la coesione, il detto principio deve verificarsi nei gas più perfettamente che nei liquidi.

Perciò quando si comprime un gas il suo volume scema finchè la sua forza espansiva faccia equilibrio alla pressione esterna, e in tal caso ogni unità di superficie, tanto nell'interno della massa gazosa quanto al suo contorno, sopporta eguale pressione sulle due faccie.

3. Fenomeni dipendenti dal principio di Pascal nei gas. — Avviene soventi che se in una camera si trovano porte o finestre mobili, aprendo o chiudendo una di esse, si veggono o si sentono le altre a muoversi, nè solo quelle che si trovano di fronte, ma anche le laterali. Il fenomeno dipende pure dal trasmettersi le pressioni nei gas in ogni senso, perchè quando si apre o si chiude una porta o finestra si produce una variazione della pressione in una parte dell'aria della camera, la quale si trasmette in tutte le direzioni.

§ 65. Il peso dei gas e la pressione atmosferica.

1. Il peso dei gas. — Galileo Galilei fu il primo che dimostrò (1620) *il peso dei gas*, provando che un pallone di vetro pieno d'aria rarefatta col calore pesa meno che pieno d'aria non rarefatta.

Lo stesso fatto si prova oggidì più perfettamente colla *pompa pneumatica*, colla quale si può estrarre l'aria da un recipiente.

Si prende un pallone di vetro munito di chiavetta (fig. 104) che lo chiude ermeticamente, cioè a tenuta d'aria, e lo si pesa dapprima pieno di questa; indi si estrae la medesima e lo si pesa di nuovo; si osserva così una diminuzione di peso. Lo stesso avviene con altri gas.

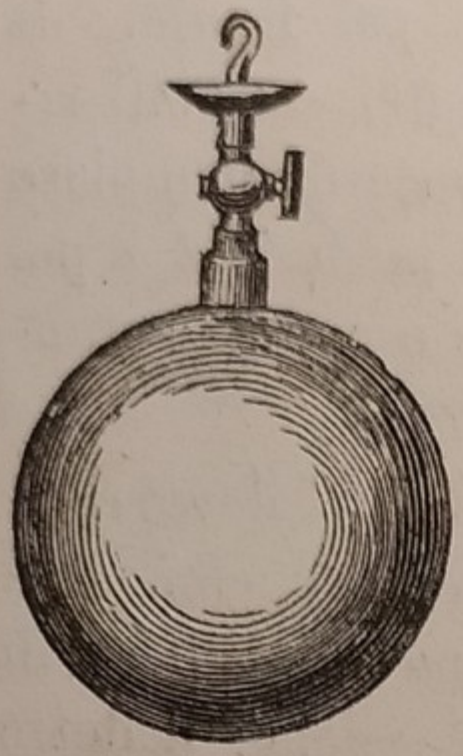


Fig. 104.

Un litro d'aria secca, a 0°, e al livello del mare (poichè in alto l'aria diviene rarefatta) pesa 1,293 *gr.*, come già si è veduto.

2. Atmosfera. — Con tal nome si comprende la massa gazosa che circonda il globo terrestre. La chimica moderna ha dimostrato che è un miscuglio di più corpi aeriformi, fra i quali i due principali sono l'azoto e l'ossigeno, nella proporzione di $^4/_5$ circa del primo e $^1/_5$ circa del secondo.

Oltre i detti gas principali l'atmosfera contiene vapore acqueo in quantità variabile, che proviene dalla evaporazione delle acque, gas carbonico in piccola quantità (da 3 a 6 decimillesimi) il quale proviene dalla combustione del carbone e dalla respirazione degli animali, ed $^1/_{100}$ circa di un gas inerte al quale fu dato il nome di *argon*.

Infine nell'aria si trova ancora il pulviscolo atmosferico, costituito da particelle di sostanze minerali, da germi di piante e di animali.

Malgrado la forza espansiva dei gas, l'aria che circonda il nostro globo non si espande indefinitamente negli spazi planetari, perchè la forza espansiva che allontana le molecole dal centro della terra decresce col decrescere dell'espansione e col diminuire della temperatura, onde ad una certa altezza quella forza è equilibrata dalla gravità che decresce meno rapidamente. L'altezza a cui avviene tale equilibrio, cioè l'altezza dell'atmosfera è ancora ignota (*).

3. Pressione atmosferica. — Se ogni metro cubico d'aria pesa 1,293 *kg.* è evidente che l'aria che avvolge il globo ter-

---

(*) Secondo lo Schiaparelli, dalle osservazioni delle stelle cadenti risulta che l'altezza dell'atmosfera deve oltrepassare i 200 chilometri.

restre deve esercitare una pressione considerevole sulla superficie dei corpi. Questa pressione agisce continuamente sulla detta superficie e da ogni parte, e perciò non si manifesta che quando la si impedisce di agire da qualche parte, siccome provano i seguenti esperimenti:

4. Emisferi di Magdeburgo. — Così chiamansi due emisferi cavi di ottone (fig. 105) i cui orli levigati e piani combaciano esattamente a tenuta d'aria. Uno di essi, munito di un tubo con chiavetta (R), è terminato da un piede cavo, che si può applicare al piatto della pompa pneumatica.

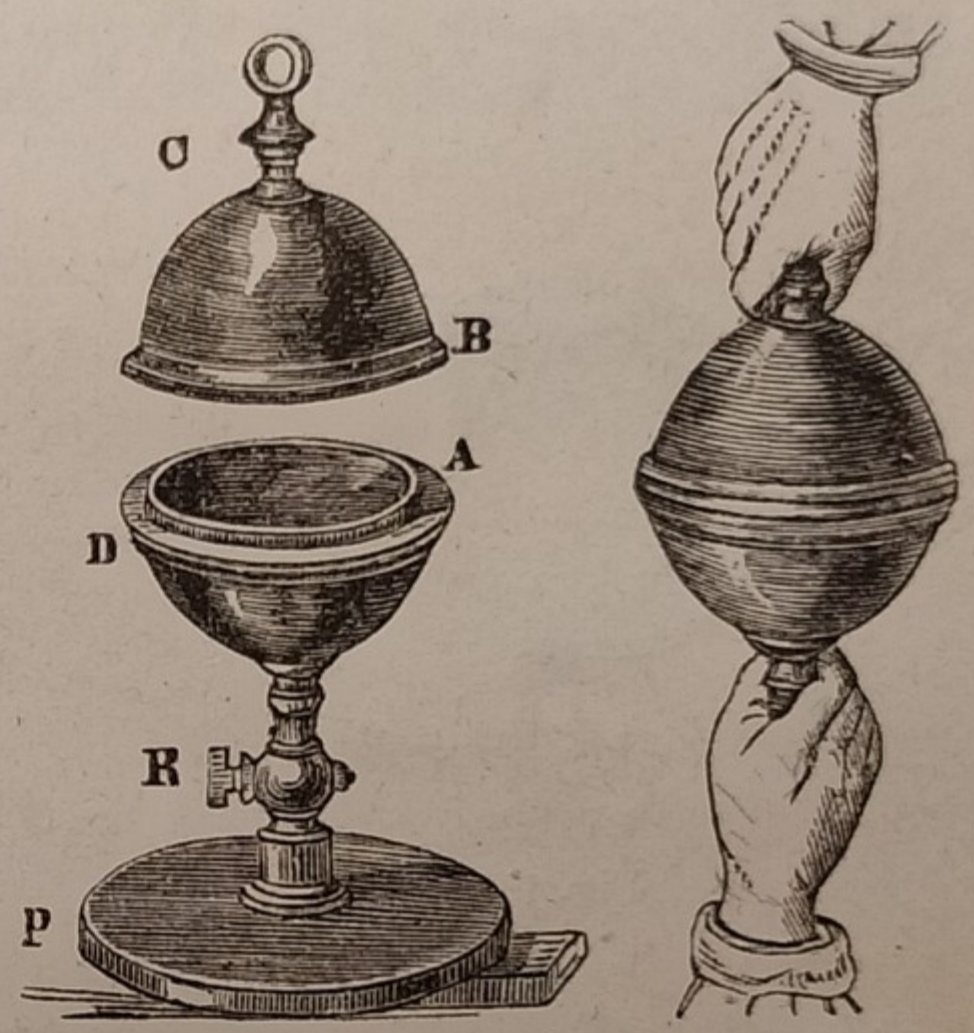


Fig. 105.

Quando l'aria contenuta nella cavità dei due emisferi ha la stessa densità di quella esterna, allora essi si lasciano separare senza difficoltà. Ma se, per mezzo della pompa pneumatica, si rarefà l'aria nell'interno dei medesimi, allora per separarli si trova difficoltà tanto maggiore, quanto maggiore è la differenza tra la densità e pressione dell'aria esterna e quella dell'interna, e quanto maggiore è la superficie degli emisferi.

Di più, la trazione per separarli è sempre eguale in qualunque posizione si tengano, il che prova che la pressione atmosferica è eguale in ogni senso.

L'esperienza venne fatta la prima volta, nel 1654, da Ottone di Guerike, borgomastro (sindaco) di Magdeburgo (in Sassonia), avanti l'imperatore Ferdinando III, con assai grandi emisferi, cosicchè 16 cavalli, 8 per parte, non furono capaci di separarli.

5. Crepavescica. — Ad una bocca di una tubulatura di vetro (fig. 106), aperta ad ambe le estremità, si applica con ermetica legatura una pelle di vescica alquanto umida, e l'altra bocca, ad orlo levigato, si applica al piatto della pompa pneumatica; allora operando la rarefazione dell'aria, si osserva che

la vescica diviene dapprima concava, poi scoppia con forte detonazione. Quindi il nome di *crepavescica*.

L'incurvamento e la rottura della vescica sono effetti della pressione atmosferica dall'alto in basso, non più equilibrata dalla stessa pressione che agiva prima con eguale energia dal basso in alto. La detonazione è effetto dello scuotimento dell'aria la quale irrompe con violenza nell'interno del tubo, allorchè la vescica viene lacerata.

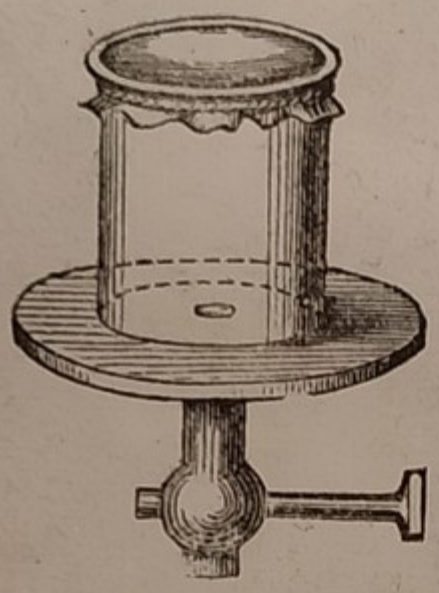


Fig. 106.

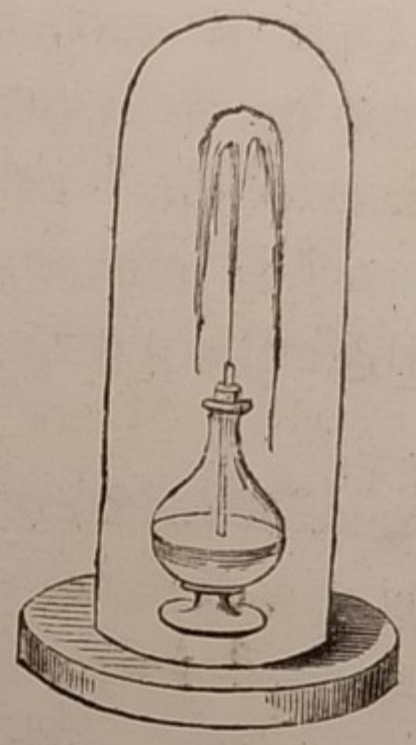


Fig. 107.

6. Altri effetti della pressione atmosferica. — Altra esperienza dipendente dalla pressione atmosferica è quella della *pioggia di mercurio* che dimostra la porosità.

È pure un effetto della pressione atmosferica l'aderire dei recipienti in cui si fa il vuoto al piatto della pompa pneumatica su cui vengono collocati.

I seguenti esperimenti dimostrano ad un tempo la forza espansiva dei gas e la pressione dell'aria.

Una vescica aperta per modo che l'aria possa esercitarvi la sua pressione dentro e fuori rimane avvizzita. Ma se si lascia un poco d'aria nella medesima e se ne lega il collo, in modo che quella non possa fuggire, indi la si colloca sotto una campana nella quale si rarefà l'aria, si vede la vescica gonfiarsi e, se la rarefazione è sufficiente, può anche scoppiare.

Così pure le mele avvizzite poste sotto la campana pneumatica si vedono gonfiare e divenire turgide, perchè diminuendo la pressione sulla superficie esterna i gas interni si espandono. E i liquidi vischiosi e gazosi, come la birra, posti sotto una campana in cui viene rarefatta l'aria spumeggiano per l'espansione dei gas interni.

Se al di sotto di una campana applicata al piatto della pompa pneumatica si pone una boccetta (fig. 107), alla cui bocca è applicato un tappo traversato da un breve tubo di vetro che pesca nell'acqua contenuta nel recipiente, appena si incomincia la rarefazione dell'aria nella campana si osserva il liquido della boccetta zampillare pel tubo, perchè la pressione

dell'aria circostante al medesimo nel recipiente non è più equilibrata dalla pressione atmosferica diminuita nell'interno del cannello. Chiamasi *fontana di rarefazione.*

Sulla pressione atmosferica è fondato l'uso delle *pipette*, che sono cannelli di vetro dilatati verso il mezzo e terminati inferiormente in punta (fig. 108). Si immerge lo stromento in un liquido, e per la bocca superiore si aspira l'aria contenuta nel cannello, e così la pressione atmosferica esterna lo solleva nel medesimo. Indi turata la bocca superiore del cannello col dito, lo si può estrarre dal liquido senza che questo cada perchè la pressione atmosferica che agisce dal basso in alto alla bocca inferiore fa equilibrio al suo peso.

Fig. 108.

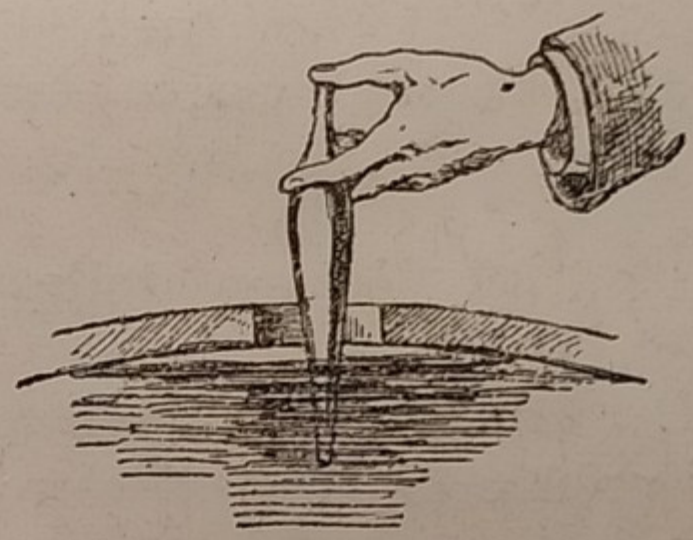


Fig. 109.

Fig. 110.

Se l'orifizio inferiore del cannello è troppo largo allora il liquido cade perchè vi si possono stabilire contemporaneamente due correnti, l'una di aria che entra, l'altra di liquido che esce; mentre ciò non è possibile se quell'orifizio è abbastanza stretto.

Se poi si apre il cannello superiormente, allora il liquido effluisce in basso, perchè in tal caso le due pressioni che l'aria esercita contemporaneamente alle estremità della colonna liquida sono contrarie e pressochè eguali, per la piccola differenza di altezza; perciò il liquido cade pel suo peso.

Lo stesso avviene coll'*assaggia vino* (fig. 109).

Così pure nell'*imbuto magico* l'acqua nascosta fra le sue due pareti effluisce o no per la bocca inferiore secondo che col pollice si apre o chiude un forellino superiore F, (fig. 110) vicino al manubrio.

Nello stesso modo non effluisce il vino da una botte ripiena, quando si apre il cannello inferiore, se questo non è troppo grande, e se è chiuso il cocchiume, o la bocca sovrastante; perchè avvenga l'efflusso bisogna aprire questa affinchè la pressione atmosferica possa agire superiormente, e fare equilibrio alla sua stessa pressione alla bocca del cannello.

Fig. 111.

Se si copre un bicchiere ripieno totalmente o parzialmente di acqua, con un pezzo di carta, lo si può capovolgere senza che l'otturatore si distacchi e il liquido cada (fig. 111) perchè quello impedisce la penetrazione dell'aria, mentre permette l'azione della pressione atmosferica che sostiene la colonna d'acqua, e ne sosterrebbe una alta 10 metri, come vedremo.

§ 66. Valore della pressione atmosferica.

1. Sollevamento dell'acqua nei tubi vuoti di aria. — Se si prende un tubo di vetro lungo alcuni centimetri, chiuso ad un'estremità e aperto dall'altra, come le *campanelle di assaggio* che usano i chimici, lo si riempie d'acqua, e poi turata l'estremità aperta col dito si capovolge la campanella e se ne immerge la bocca nell'acqua di un recipiente, si vede che, anche levando il dito che la otturava, l'acqua non discende, ma rimane sospesa nella campanella.

Se si facesse la stessa esperienza con una campanella alta più di 10 metri, si vedrebbe che l'acqua rimarrebbe sospesa all'altezza di circa metri 10,336.

Parimenti, se si prende un tubo di vetro aperto ai due capi, vi s'introduce uno stantuffo (formato semplicemente con un po' di stoppa legata ad una bacchetta di legno o metallo), indi si immerge, come si fa colle siringhe, l'estremità inferiore del tubo nell'acqua, sollevando lo stantuffo si vede il liquido salire; e se il tubo fosse alto più di 10 metri, e lo stantuffo lo chiudesse ermeticamente, cioè non lasciasse penetrare l'aria al di sotto, si potrebbe così sollevare l'acqua all'altezza di 10 metri $^1/_3$.

Su questo fatto sono appunto fondate, come vedremo, le pompe idrauliche aspiranti, che sollevano l'acqua per aspirazione.

La causa di tale sospensione dell'acqua è evidentemente la pressione che l'aria col suo peso esercita sul liquido circostante al

tubo, o alla campanella dall'alto in basso; trasmettendosi in tutte le direzioni, deve agire anche dal basso in alto nell'interno del cannello e fare equilibrio al peso dell'acqua contenutavi.

Dunque la pressione dell'aria sulla superficie dei corpi è eguale al peso di una colonna d'acqua alta 10 metri e $^1/_3$ circa.

2. Esperienza di Torricelli. — Ai tempi di Galileo dominava nelle scuole la dottrina di Aristotele, la quale attribuiva il fatto del sollevamento dell'acqua nelle pompe aspiranti, nelle quali si fa il vuoto in un tubo mediante uno stantuffo, all'*orrore della natura pel vuoto*. Torricelli, discepolo di Galilei, pensando invece che la vera causa del detto sollevamento fosse la pressione dell'aria, e che una colonna di mercurio sostenuta da tale pressione avrebbe dovuto avere un'altezza tante volte minore di quella dell'acqua quante volte la sua densità è maggiore, fece pel primo il seguente esperimento.

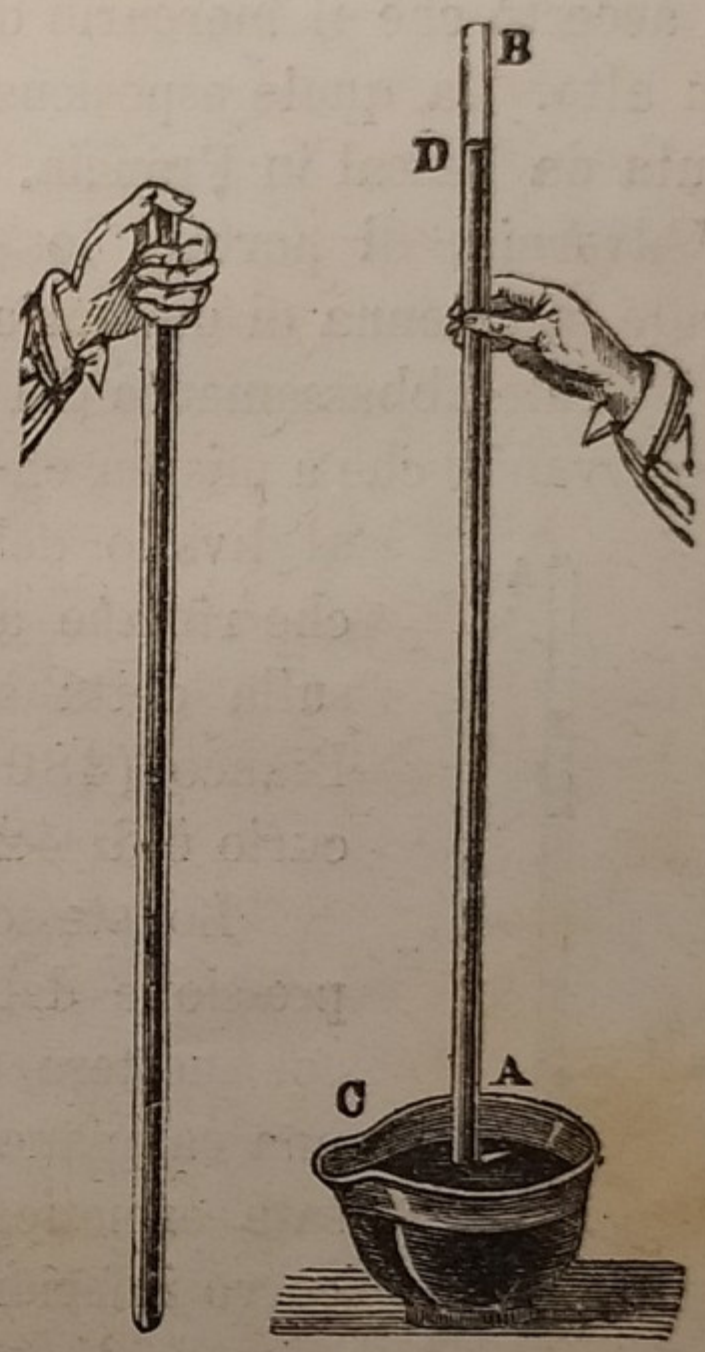


Fig. 112.

Prese un tubo di vetro lungo circa un metro, aperto ad un capo e chiuso all'altro, lo riempì di mercurio, poscia turatane l'estremità aperta col dito (fig. 112) lo capovolse e ne immerse la bocca nel mercurio di una vaschetta (C): allora ritirando il dito vide che il mercurio, dopo essere disceso alquanto nel tubo, si fermò all'altezza di 1 braccio e $^1/_4$, pari a 76 *cm*. (*).

(*) Nell'eseguire tale esperienza conviene avere cura di togliere le bolle d'aria che rimangono aderenti al tubo. Perciò non lo si riempie subito completamente di mercurio, ma solo fino a uno o due centimetri dall'estremità aperta; indi turata questa col dito, si capovolge alternativamente il tubo tre o quattro volte. Così la grossa bolla d'aria rimasta sopra il mercurio, percorrendo la lunghezza del liquido, raccoglie le bollicine aderenti alla parete. Allora si finisce di riempire il tubo con mercurio, e lo si capovolge per collocarlo nella vaschetta.

Ma per togliere più perfettamente l'aria conviene fare bollire il mercurio nel tubo, come fanno i costruttori di barometri.

Questa importante esperienza che bandì dalle scuole l'antico errore dell'*orrore pel vuoto*, e fece conoscere *la grandezza della pressione atmosferica*, ebbe luogo a Firenze nel 1643.

3. Conferma dell'esperienza di Torricelli. — A confermare l'esperienza di Torricelli, Claudio Beriguardi nello stesso anno (1643) portò lo strumento sulle montagne della Toscana e accertò che il mercurio discende nel tubo a misura che si va in alto. La quale esperienza venne, cinque anni più tardi, ripetuta da Pascal in Francia. Egli pregò un suo parente, abitante l'Alvernia, di portare lo strumento sul Puy-de-Dôme; quegli vide la colonna di mercurio discendere di otto centimetri circa.

Tale abbassamento del mercurio nel tubo di vetro si intende osservando che a misura che si sale, diminuisce l'aria sovrastante al livello del mercurio nella vaschetta, e quella che rimane al disotto non esercita più pressione sulla detta superficie. Alla sommità del monte Bianco (4800 *m.* circa) l'altezza media del mercurio è di 42 *cm.*

Fig. 113.

Lo stesso risultato si ottiene diminuendo la pressione dell'aria sulla superficie del mercurio, col mettere sul piatto della pompa pneumatica una campana, la cui parete superiore è attraversata ermeticamente da un tubo torricelliano ricurvo inferiormente e ivi comunicante con un tubo aperto, di maggior diametro, il quale fa l'ufficio di vaschetta (fig. 113). A misura che si toglie l'aria nella campana si vede il mercurio discendere nel tubo, e raggiungerebbe in questo esattamente il livello che ha nel ramo aperto, se colla pompa pneumatica si togliesse tutta l'aria della campana, il che però, come vedremo, non è possibile.

Le quali esperienze confermano pienamente essere la pressione dell'aria sulla superficie del mercurio nella vaschetta la causa del sollevamento del medesimo.

4. Valore della pressione atmosferica in kg. — Ora è facile calcolare il valore della pressione atmosferica in *kg.* su una data superficie. Perciò basta osservare che su un centimetro quadrato la colonna di mercurio premente è di 76 cm^3. Se fosse

acqua, il suo peso sarebbe semplicemente 76 *gr.*; essendo mercurio sarà: $76 \times 13{,}6 = 1033{,}6$ *gr.* $= 1{,}033$ *kg.* circa; e sopra 1 m^2. $= 100 \times 100 = 10000$ cm^2., è: $1{,}0336 \times 10000 = 10336$ *kg.*

Una così grande pressione non schiaccia punto i corpi più fragili e pieghevoli, perchè essa agisce egualmente da ogni parte, trasmettendosi la pressione nei gas come nei liquidi in ogni senso; per la stessa ragione non schiaccia il nostro corpo perchè agisce anche dall'interno all'esterno per mezzo dell'aria che continuamente trovasi nelle cavità del corpo e si espande pei tessuti; la superficie media del corpo umano essendo un metro quadrato e mezzo circa la pressione su di essa è di circa 15000 Kg.

5. La pressione atmosferica nelle camere. — La pressione atmosferica nell'interno di una camera è la stessa che al di fuori alla medesima altezza, perchè essa si trasmette nell'interno per le fenditure delle porte e finestre.

In una camera ermeticamente chiusa la pressione atmosferica esterna non potrebbe agire internamente, ma agirebbe la pressione dovuta alla forza espansiva dell'aria ivi imprigionata colla pressione esterna, come avviene sotto una campana pneumatica. Solo quando si facesse variare la densità dell'aria contenuta nella camera ermeticamente chiusa, mediante una macchina pneumatica collocata esternamente, varierebbe la sua forza espansiva e quindi la sua pressione sui corpi immersi nella medesima.

6. Barometro. — L'apparecchio di Torricelli chiamasi *barometro*, che vuol dire misuratore della pressione dell'aria (*baros*, peso).

Lo spazio vuoto d'aria che rimane nel tubo al di sopra del mercurio dicesi *vuoto barometrico* o *torricelliano*, od anche *camera barometrica*.

Tuttavia, in questa non vi è il vuoto assoluto, perchè contiene ancora vapore di mercurio; ma la forza espansiva di questo, alle temperature ordinarie, è così piccola, che la depressione del liquido è solo una piccola frazione di millimetro, come si vedrà nello studio della forza espansiva dei vapori.

7. Altezza barometrica. — La distanza verticale dal livello del mercurio nel tubo a quello nella vaschetta dicesi *altezza barometrica*. Inclinando la canna varia lo spazio vuoto, e quindi

la lunghezza della colonna di mercurio entro la medesima, ma l'altezza barometrica è sempre la stessa, essendo la pressione dei liquidi solo dipendente dalla base e dall'altezza verticale. Se poi si inclina il tubo in modo che quell'altezza sia di 76 centimetri, o minore, il mercurio lo riempie completamente.

Così pure se il tubo avesse dilatazioni o stringimenti, ovvero fosse comunque ricurvo, purchè la sua altezza verticale sia di 76 *cm.*, il mercurio si solleva sempre egualmente per la detta ragione.

L'altezza barometrica varia in un medesimo luogo col tempo, perchè varia la pressione atmosferica, specialmente per causa dei venti, siccome insegna la Meteorologia.

L'altezza di 76 *cm.* è solo un valore medio che vale per la superficie terrestre al livello del mare, perchè anche per tale livello l'altezza varia col tempo e coi luoghi, e oscilla tra 72 e 80 *cm.*

Intanto si considera soventi la pressione di un'atmosfera, e si intende quella di una colonna di mercurio, alta 76 *cm.*, la quale, come si è visto, è di 1,0336 *kg.* per centimetro quadrato e chiamasi *pressione normale.*

§ 67. Barometri.

1. Principali forme di barometri. — L'apparecchio dell'esperienza di Torricelli non è abbastanza maneggevole e trasportabile, perchè il mercurio della vaschetta può facilmente uscire dalla medesima. Perciò ha ricevuto parecchie modificazioni per adattarlo ai differenti usi.

I barometri si possono dapprima distinguere in due categorie, cioè quelli di *uso comune*, e quelli di *uso scientifico*.

I barometri di uso comune sono:

1° *Il barometro comune a vaschetta, o a sifone;*
2° *Il barometro a quadrante;*
3° *Il barometro metallico.*

I barometri di uso scientifico sono varii. I più usati sono:

1° *Il barometro normale fisso da osservatorio;*
2° *Il barometro portatile di Fortin.*

Nella costruzione del barometro il mercurio è preferibile ad ogni altro liquido, perchè essendo il più denso assume minore altezza; inoltre esso, se è puro, non aderisce al vetro.

2. Barometro ordinario a vaschetta, o a sifone. — Consiste in un tubo barometrico che pesca inferiormente nel mercurio contenuto in una vaschetta chiusa (fig. 114). L'uno e l'altra sono fissi ad una tavoletta di legno.

Fig. 114.

Oppure il tubo è inferiormente ricurvo e termina in una bolla che costituisce la vaschetta (fig. 115). Allora si dice *barometro a sifone.*

La scala è una divisione in centimetri e millimetri segnata sopra una lastra metallica fissa alla parte superiore della tavoletta. Ordinariamente si segnano solo i centimetri e millimetri più elevati, corrispondenti al livello del mercurio nel tubo nei casi ordinari in cui deve servire lo strumento, perchè quelli inferiori sono inutili.

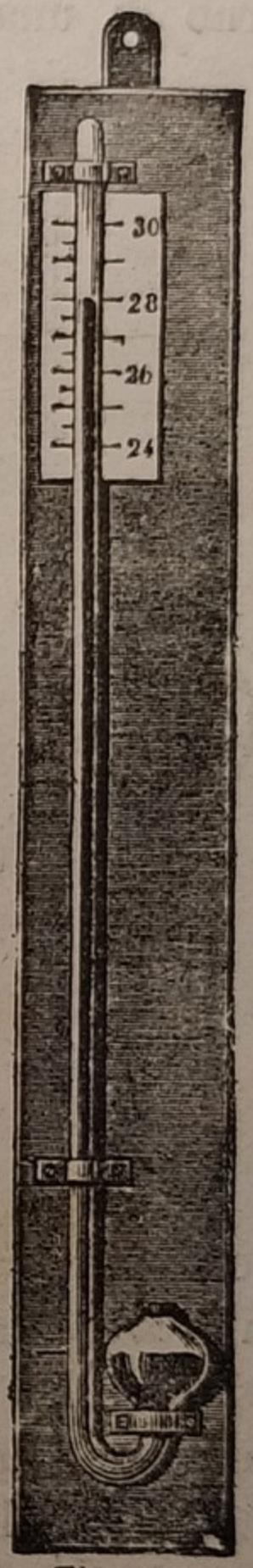


Fig. 115.

Lo zero della scala corrisponde al livello medio del mercurio nella vaschetta.

Ora tale scala serve solo per le osservazioni ordinarie che non richieggono grande precisione, perchè se il mercurio si abbassa nel tubo al di sotto del livello medio, si solleva nella vaschetta, ed inversamente. E se la vaschetta non è così ampia che l'innalzamento e l'abbassamento del livello del mercurio nella medesima sieno trascurabili, la sola osservazione dell'altezza del mercurio nel tubo sulla scala fissa, senza riguardo a quello del mercurio nella vaschetta, non dà l'altezza barometrica esatta. Tale trascuranza è ammissibile per le osservazioni ordinarie, ma non nelle osservazioni scientifiche. Perciò i detti barometri servono solo per le osservazioni barometriche famigliari che si fanno per avere indicazioni intorno al bello o brutto tempo, perchè nei nostri paesi l'altezza barometrica, in generale, cresce quando il cielo si ras-

serena e l'aria diviene tranquilla, diminuisce invece quando l'atmosfera s'intorbida e spira vento.

3. Barometro a quadrante. — È un barometro in cui le variazioni dell'altezza del mercurio sono indicate da un indice girevole su un quadrante (fig. 116). Il tubo è contenuto nell'interno di una tavoletta alquanto larga (non rappresentata nella figura) e munita di un quadrante verso il mezzo. L'indice (*ab*) è fisso sull'asse di una carrucolina (*o*), sulla quale passa una funicella, cui sono attaccati due piccoli pesi, uno dei quali (*c*), un poco maggiore dell'altro (P), appoggia sulla superficie libera del mercurio della vaschetta.

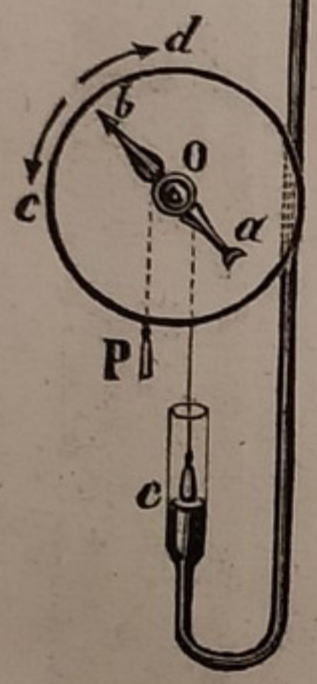


Fig. 116.

Quando la pressione atmosferica aumenta, il mercurio abbassandosi nella vaschetta fa abbassare il peso (*c*) che appoggia sul medesimo, e per mezzo della funicella viene fatta girare la carrucola e l'indice verso destra. Inversamente, quando diminuisce la pressione.

Il quadrante viene graduato dietro le indicazioni di un barometro campione. Esso porta le indicazioni del tempo, distinte colle parole: *pioggia*, *variabile*, *bel tempo*, ecc.

Il barometro a quadrante è antichissimo (Hooch, 1683). Venne anche perfezionato sostituendo alla carrucolina una piccola rúota dentata ingranante con un'asta dentata fissa verticalmente al galleggiante.

Esso ha il vantaggio di dare indicazioni assai apparenti per mezzo del lungo indice e del grande quadrante. Ma è difettoso in causa dell'attrito degli ordigni che fanno muovere l'indice; cosicchè quando si vuole fare un'osservazione conviene facilitarne i movimenti per mezzo di piccole scosse all'intero apparecchio.

4. Barometro normale. — Negli osservatorî meteorologici è indispensabile il possedere barometri perfetti nei quali sieno evitate tutte le cause di errore, provenienti, sia dalla depressione capillare, sia dalla posizione non esatta dello zero della scala.

Si usa a tal fine un *barometro di precisione*, detto *barometro normale*, il quale serve specialmente al confronto degli altri barometri per determinare le correzioni da farsi a questi.

Uno dei barometri normali più usati è quello di Régnault (fig. 117). È costituito da un tubo barometrico (B C), del diametro di 2 a 3 centimetri, perchè la depressione capillare vi sia insensibile, il quale pesca nel mercurio contenuto in una vaschetta rettangolare di ferro munita lateralmente di una vite (A), appuntata ai suoi capi, e di lunghezza conosciuta. Il tutto è portato da una tavoletta saldamente fissa nel muro.

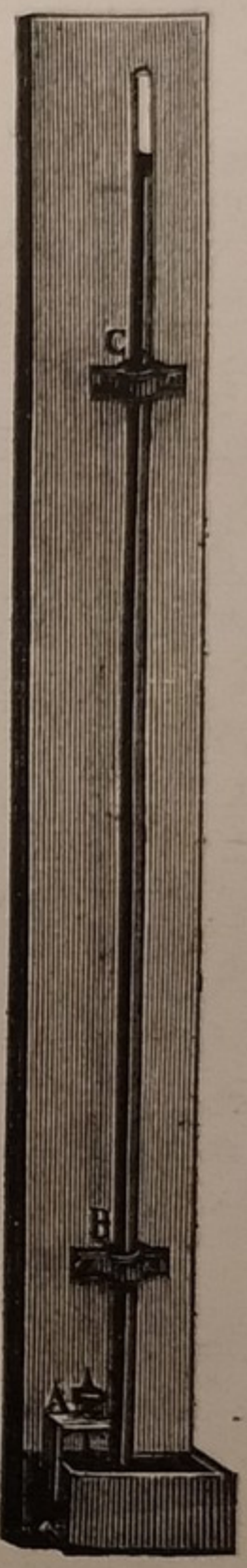


Fig. 117

Per fare un'osservazione si fa discendere la vite finchè la sua punta inferiore sia esattamente in contatto col mercurio, e poi si misura esattamente col catetometro (*) la distanza verticale fra la punta superiore della vite e il livello del mercurio nel tubo e a quella si aggiunge la lunghezza conosciuta della vite.

5. Barometro Fortin (1820). — È un barometro con vaschetta a fondo mobile. Il suo tubo (fig. 118, pag. 216) è protetto da un astuccio metallico, sul quale è segnata una scala fissa che parte dal livello costante che si può dare al mercurio nella vaschetta.

Questa è costituita di tre parti. L'inferiore è una borsa di pelle di camoscio (fig. 119, pag. 216), legata superiormente ad un anello (A A) di legno di bosso, e inferiormente ad un pezzo di legno applicato all'estremità superiore di una vite (V) che attraversa il fondo (FF) dell'astuccio metallico della vaschetta, permodochè girando quella si solleva o si abbassa il fondo della borsa e quindi il mercurio. La parte mediana è costituita dall'anello (AA) di bosso, cui è legata superiormente la borsa, avvitato ad un altro anello superiore (*aa*) della stessa sostanza. Infine la parte superiore della vaschetta consiste in un cilindro di vetro (OO) applicato inferiormente alla parete metallica (GH), e chiuso superiormente da un duplice coperchio di legno e metallo, con una tubulatura centrale (BB),

---

(*) Il catetometro è uno strumento di precisione che serve a misurare le differenze di livello fra due punti e consta di una colonna graduata in millimetri, verticale, lungo la quale scorre un cannocchiale orizzontale.

alla quale è assicurata la canna barometrica mercè una pelle di camoscio legata per un'estremità a quella tubulatura e per l'altra

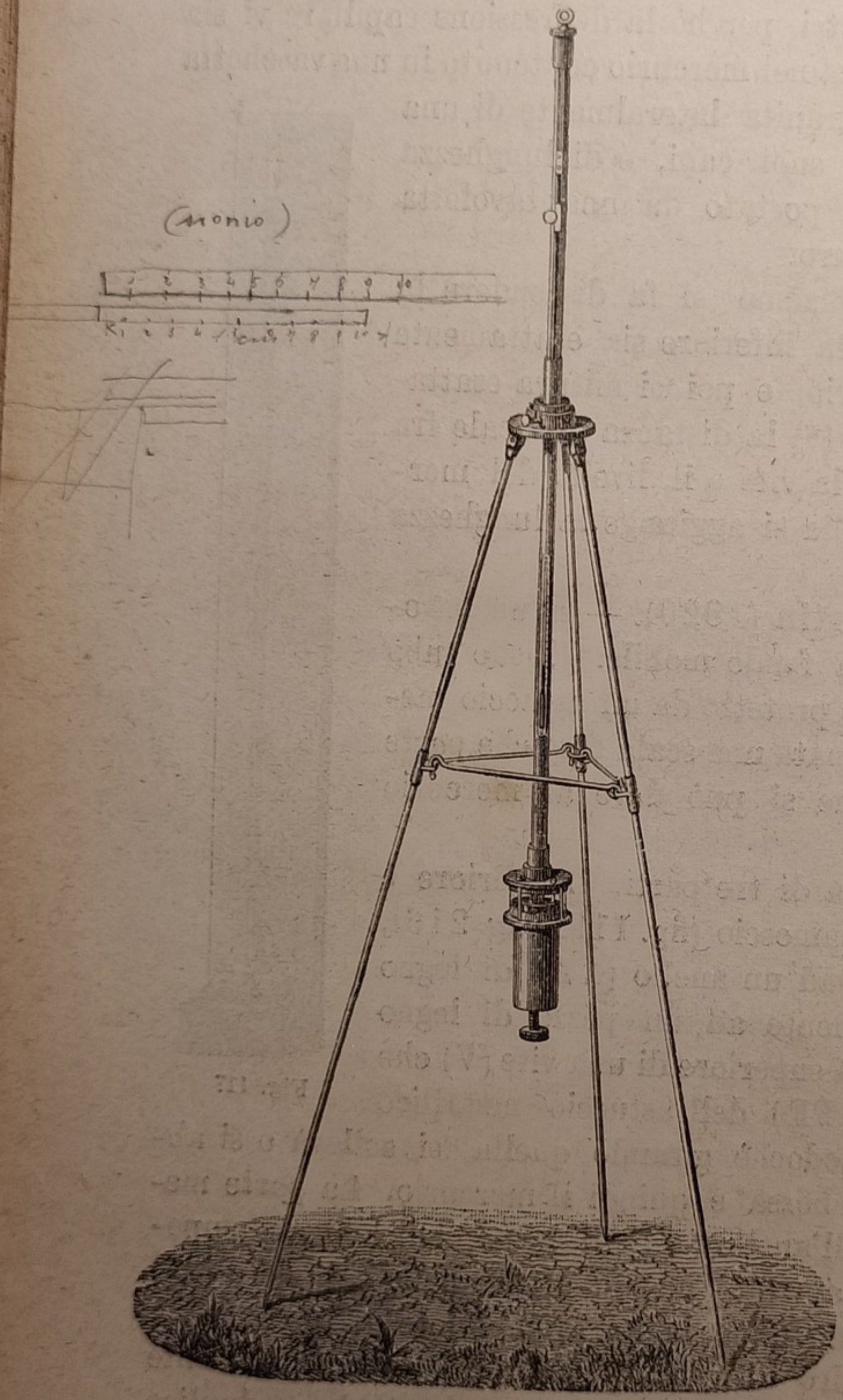


Fig. 118.

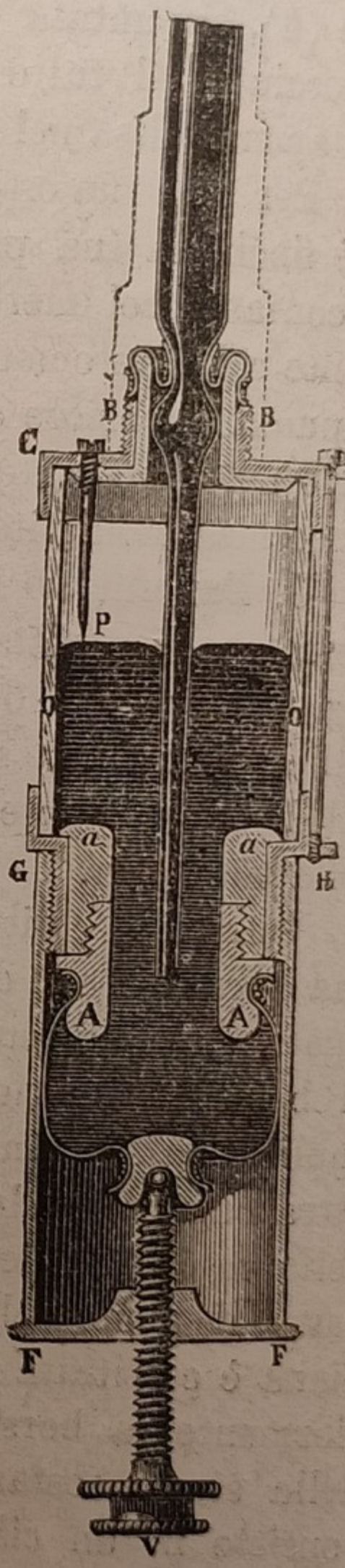


Fig. 119.

ad una strangolatura del tubo. Codesta pelle, mentre non permette l'uscita del mercurio, lascia agire la pressione atmosferica a traverso i suoi pori. Il coperchio (CC) e la parete metallica in-

feriore (GH) sono congiunti mediante tre verghette di metallo (delle quali si vede quella di destra CH).

Infine al coperchio della vaschetta è fissa una punta verticale d'avorio (P), la cui estremità inferiore corrisponde allo zero della scala, tracciata, come si disse, sul tubo di ottone che protegge la canna, il quale è avvitato inferiormente alla tubulatura metallica (BB) del coperchio della vaschetta.

Per fare un'osservazione con tale strumento, lo si sospende superiormente, cosicchè esso assuma posizione verticale. Quando sia necessario, si fa uso, per tale sospensione, di un tripode (fig. 118) con una sospensione cardanica (pag. 65).

Indi si gira la vite del fondo finchè il livello del mercurio nella vaschetta venga ad affiorare esattamente la punta di avorio fissa verticalmente nel coperchio di quella. Il che si ottiene quando la punta e la sua immagine, data dal mercurio, paiono toccarsi. Siccome da tale punta comincia la graduazione della scala per mezzo della quale si legge poi l'altezza del mercurio nel tubo, così si ottiene il livello costante del liquido nella vaschetta, e resta superata la prima difficoltà che presenta l'esattezza delle osservazioni barometriche.

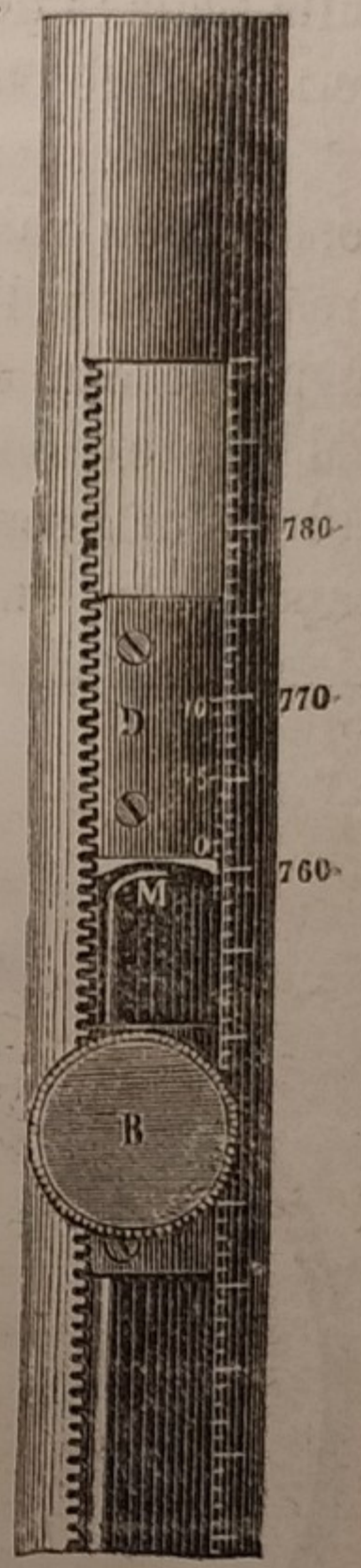


Fig. 120.

La seconda difficoltà consiste nella esatta lettura dell'altezza del mercurio nel tubo. Perciò l'astuccio metallico che lo protegge è munito, sul margine di una delle due finestre che lasciano vedere la sommità della colonna barometrica (fig. 120), di una graduazione a millimetri, ed un verniero (*) scorrevole mediante un bottone (B) dà i decimi di millimetro.

Per osservare l'altezza barometrica si fa girare il bottone finchè i due orli inferiori del verniero, uno dei quali avvolge il tubo dalla parte rivolta all'osservatore e l'altro dalla parte opposta, si trovino pel suo occhio in linea retta colla sommità del

---

(*) Il verniero è una strumento di precisione che serve a dare le frazioni di millimetro e consta di un regoletto adattato parallelamente alla graduazione principale il quale se, ad esempio, deve dare i decimi di millimetro è lungo 9 *mm.* e diviso in 10 parti eguali.

menisco convesso (M) della colonna mercuriale, che si osserva su un fondo chiaro; allora si legge sulla scala dell'astuccio il numero dei millimetri costituenti quell'altezza, e quindi si leggono sul verniero i decimi di millimetro di cui lo zero del medesimo è sovrastante all'ultimo millimetro che misura l'altezza del mercurio sulla scala; i detti decimi sono dati dal numero della divisione del verniero che coincide con un segno della graduazione principale.

Per trasportare il barometro si solleva, mediante la vite, il fondo della vaschetta, fino a che tutta l'aria di essa sia uscita a traverso la pelle di camoscio, ed il mercurio riempia completamente la canna, ciò che si riconosce per la resistenza che si trova nel girare la vite. Così non vi è più pericolo che il liquido oscilli e coi suoi urti rompa il tubo, o che entri aria in questo, il quale si può capovolgere e mettere in un astuccio di cuoio che si porta a tracolla.

6. Barometro olosterico di Vidi. — Il barometro metallico più in uso è quello di Vidi (fig. 121), che dicesi anche *olosterico*, che significa: interamente solido (*olos*, intero, *stereos*, solido).

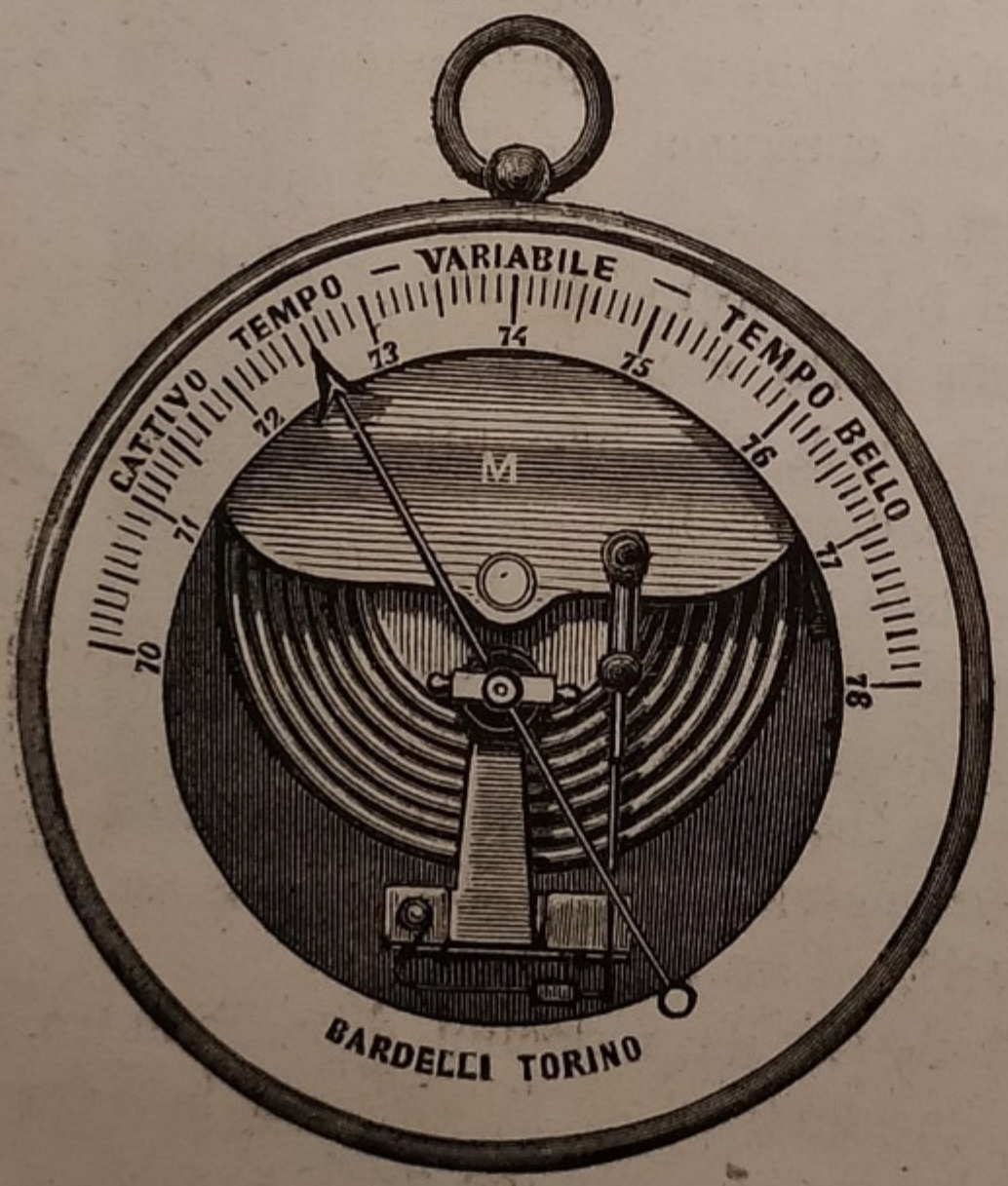


Fig. 121.

Al fondo di una scatola metallica esterna che contiene tutto lo strumento si trova una scatola circolare di lamina metallica sottilissima, le cui due pareti superiore e inferiore sono sinuose allo scopo di aumentarne la flessibilità.

Essa è vuota d'aria, e perciò sensibile alle variazioni della pressione atmosferica, la quale crescendo avvicina alquanto (una piccola frazione di millimetro) le sue pareti, e quando diminuisce, esse per elasticità si riallontanano. Cotale movimento delle pareti è anche facilitato da una piccola molla spirale che si trova entro la scatola vuota.

Infine, per mezzo di una molla ricurva (M), fissa inferiormente al fondo della scatola esterna, superiormente al centro della scatola sinuosa, e di un sistema di leve e rocchetti, quei piccolissimi movimenti delle pareti sinuose vengono, nei piccoli modelli, amplificati 600 volte all'estremità di un indice mobile su un quadrante graduato, e assai più nei grandi.

L'indice o lancetta gira verso destra quando la pressione aumenta, verso sinistra quando decresce. La graduazione del quadrante viene fatta mediante confronto con un barometro a mercurio.

Con una vite, che non si vede nella figura, si può condurre la lancetta in un punto qualunque del quadrante per regolare lo strumento e metterlo d'accordo con un barometro campione a mercurio.

7. Il barometro metallico di Bourdon (*) consta (fig. 122) di un sottile anello di ottone, cavo internamente, vuoto d'aria, ermeticamente chiuso, la cui sezione è simile a quella di una lente (come è indicato nella figura a destra); esso è fissato nel suo mezzo alla parete della scatola che lo contiene. Quando la pressione cresce, la superficie esterna dell'anello sopporta un accrescimento di pressione maggiore dell'interna, perchè la prima è maggiore della seconda; perciò la sua curvatura cresce e le sue due estremità si avvicinano: viceversa quando la pressione diminuisce, le dette estremità si allontanano. Tali movimenti si trasmettono ad un indice girevole su un arco graduato.

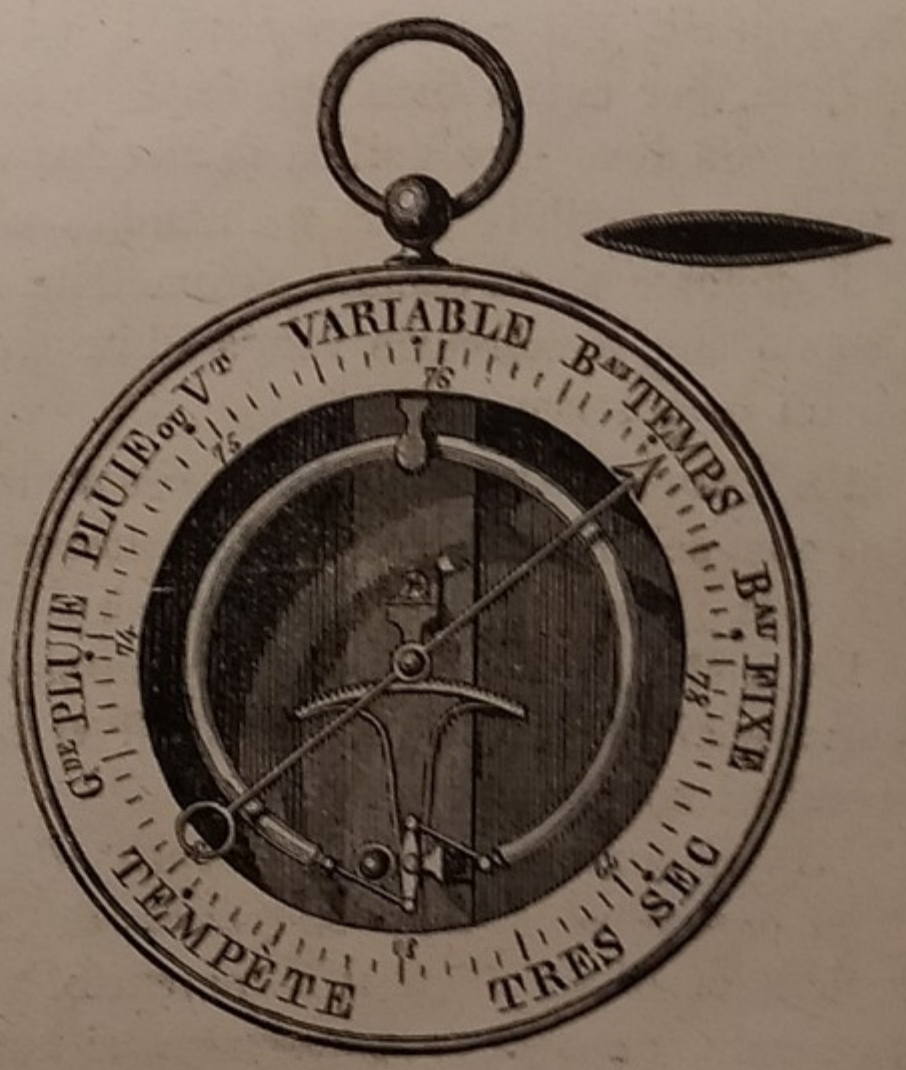


Fig. 122.

8. Vantaggi e difetti dei barometri metallici. — I barometri metallici presentano il vantaggio di essere più comodi e

(*) È meno sicuro e perciò meno usato di quello di Vidi.

portatili e meno fragili dei barometri a mercurio; perciò sono preferiti nelle escursioni alpine, e nelle regioni polari ove il mercurio si solidifica. Oggidì se ne costruiscono di quelli che hanno solo le dimensioni di un oriuolo.

Ma i detti barometri non sono così precisi come quelli a mercurio, perchè col tempo si modifica la forma e l'elasticità delle parti metalliche, permodochè riesce necessario di quando in quando una revisione della graduazione e debbono essere forniti di tabella di correzione.

9. Condizioni per l'esattezza del barometro. — Per l'esattezza del barometro debbono essere soddisfatte le seguenti condizioni:

1° Il tubo deve essere di diametro uniforme, almeno nella parte superiore, acciò il diametro del menisco, e quindi la depressione capillare, sia costante.

2° Esso deve venire lavato con acido nitrico bollente, poi con acqua distillata.

3° Il mercurio deve essere chimicamente puro, se no varia la sua densità e quindi l'altezza barometrica, ed inoltre esso aderisce al vetro e lo imbratta, per cui si dice che esso *fa la coda.*

4° Si deve fare bollire il mercurio nel tubo per scacciare il più perfettamente possibile l'aria e l'umidità che aderiscono tenacemente a quello.

Si conosce se la camera barometrica non contiene aria inclinando il tubo in modo che il mercurio venga ad urtare la sommità chiusa di esso; si sente così un urto secco.

10. Correzioni da farsi alle osservazioni barometriche. — Nelle determinazioni scientifiche precise dell'altezza barometrica bisogna fare all'altezza osservata parecchie correzioni che solo accenneremo.

Lo studioso che desidera occuparsi praticamente di tale argomento deve ricorrere ai libri speciali, nei quali vi sono tavole numeriche per fare dette correzioni speditamente.

1° *Ridurre l'altezza osservata alla temperatura qualunque* t, *a quella che si osserverebbe alla temperatura* 0°. Infatti, siccome il calore dilata i corpi, il peso specifico del mercurio varia colla temperatura; quindi per una stessa pressione atmosferica si hanno altezze barometriche maggiori o minori secondochè la temperatura è più o meno elevata; e inversamente si potrebbero avere altezze barometriche eguali per pressioni atmosferiche differenti.

Pertanto è necessario ridurre le altezze osservate a quelle che si avrebbero a temperatura costante; e si è convenuto che tale temperatura fissa sia quella di 0°.

Perciò ad ogni barometro è congiunto sempre un termometro. Anzi se ne adoperano due: uno annesso allo strumento che ne dà la temperatura, e l'altro libero che dà la temperatura dell'aria.

Parimenti si deve:

2° *Correggere l'influenza della dilatazione della scala.*

Entrambe queste correzioni sono date dalla formola

$$b' = b - 0{,}000\ 16124\ b\,t$$

nella quale

b è l'altezza barometrica osservata,
b' » » corretta,
t è la temperatura centigrada osservata.

Questa formola è somministrata dalle leggi intorno alla dilatazione dei corpi per calore.

3° *Aggiungere all'altezza ottenuta la depressione prodotta dalla capillarità.* A tale fine si sono costruite tavole nelle quali sono notate le depressioni corrispondenti ai vari diametri dei tubi e alle varie freccie dei menischi. Ma le divergenze che esistono fra i valori somministrati dai diversi sperimentatori consigliano a fare tale correzione mediante il confronto con un barometro normale, che dà così una volta per tutte la correzione da farsi alle osservazioni per la depressione capillare.

4° *Aggiungere all'altezza osservata la piccola depressione prodotta dal vapore di mercurio.* Perciò basta aggiungere all'altezza trovata il numero $0^{cm},0002\ t$, essendo t la temperatura del mercurio.

5° Infine, siccome il peso di una data colonna di mercurio varia colla latitudine e coll'altitudine, perchè varia l'intensità della gravità, così per potere paragonare le osservazioni si è convenuto *di ridurre le altezze osservate a quelle che risulterebbero alla latitudine media di 45° e al livello del mare.* Ma tali correzioni, come pure quella relativa alla temperatura, si ottengono più speditamente mediante tavole numeriche.

11. Usi del barometro. — 1° *Per le ricerche scientifiche.* L'esatta determinazione della pressione atmosferica è frequentemente necessaria nello studio dei fenomeni fisici e chimici; perciò il barometro è uno strumento indispensabile sia pel fisico come pel chimico.

2° *Per la misura delle altezze.* — Il barometro serve alla misura delle altezze, perchè col crescere dell'altezza di un luogo sul livello del mare diminuisce, come si è già notato, l'altezza della colonna barometrica, cosicchè dall'osservazione di questa si può dedurre quella.

Il mercurio essendo 13,6 volte più pesante che l'acqua a pari volume, e questa 773 volte circa più pesante che l'aria al livello del mare, consegue che il mercurio è circa $13{,}6 \times 773 = 10512{,}8$ volte più pesante che l'aria a tale livello. E siccome le altezze di due colonne fluide di egual base e peso sono in ragione inversa delle loro densità, consegue che se l'aria conservasse la densità che ha al livello del mare, ad ogni millimetro di abbassamento nella altezza barometrica corrisponderebbe un sollevamento di 10512 *mm.* $= 10^{m},512$. In tal caso per avere in metri l'altezza di un luogo sul livello del mare basterebbe moltiplicare il numero dei millimetri di abbassamento della colonna barometrica per 10,512.

Ma siccome la densità dell'aria, lungi dal potersi ritenere costante, come quella dei liquidi che sono pochissimo compressibili, diminuisce rapidamente dal basso in alto, perchè i gas sono molto compressibili e la pressione atmosferica diminuisce col crescere dell'altezza, ed inoltre variano la temperatura e l'umidità, perciò la questione di dedurre l'altezza di un luogo dall'altezza barometrica è in realtà molto più complicata.

Per risolvere il quale problema si fa uso di formole più o meno complicate secondo i casi, come pure si sono costruite tabelle, dette *ipsometriche*, nelle quali trovansi notate le altitudini corrispondenti a tutte le altezze barometriche osservabili. Ma per fare studi intorno a tale argomento conviene ricorrere ai trattati speciali.

Del resto le determinazioni barometriche delle altezze dei luoghi sono meno esatte di quelle che si ottengono colla triangolazione, sebbene più spedite.

3° *Siccome indicatore del tempo.* — Infine il barometro serve anche come indicatore probabile del bello e brutto tempo; perciò nei barometri comuni si segnano tali indicazioni, le quali però non sempre si verificano. Ma codesto argomento appartiene a un ramo della Fisica che si dice *Meteorologia*.

§ 68. Legge di Boyle o di Mariotte.

1. Variazioni del volume del gas prodotte dalle variazioni della pressione esterna. — L'esperienza della vescica avvizzita e chiusa che si gonfia quando si rarefà l'aria nella campana in cui è contenuta, e quella dell'acciarino pneumatico, in cui l'aria compressa si riduce a minor volume, dimostrano che *il volume di un gas cresce o diminuisce secondochè diminuisce o cresce la pressione esterna sul medesimo.*

2. Legge di Boyle, o di Mariotte. — Studiando le variazioni di volume che subisce una data massa di gas col variare della pressione esterna sul medesimo, l'inglese Boyle enunciò pel primo (nel 1662) la seguente legge: *rimanendo costante la temperatura, il volume di una data quantità di gas è in ragione inversa della pressione.*

Essa significa che, supposta costante la temperatura, una data massa di gas prende sotto

le pressioni	1,	2,	3,	.	. .
i volumi	1,	$^1/_2$,	$^1/_3$,	.	. .

Codesta legge viene dagli inglesi detta di Boyle, che la scoprì nel 1662, mentre i francesi la denominano di Mariotte, quantunque questi l'abbia fatta conoscere in Francia solo nel 1679.

3. Prova sperimentale della legge per le pressioni maggiori dell'atmosferica. — Si prende un tubo di vetro ricurvo inferiormente (fig. 123), avente un ramo corto e chiuso, e l'altro lungo e aperto, fisso ad una lunga tavoletta di legno provveduta di una graduazione pei due rami del medesimo.

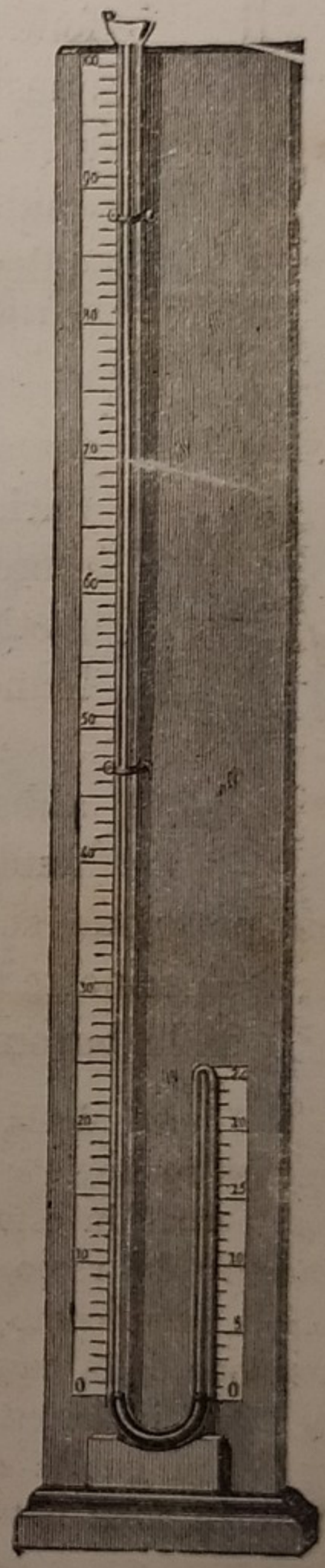


Fig. 123.

Si versa dapprima un poco di mercurio nel tubo finchè esso giunga nel ramo chiuso allo zero della scala, e il livello sia eguale nel ramo aperto, il che si ottiene facendo entrare od uscire aria dal ramo chiuso, coll'inclinare l'apparecchio da una parte o dall'altra.

Il ramo chiuso viene così a contenere dell'aria alla pressione atmosferica, nel luogo in cui si fa l'esperienza (che sarà per es. $0^m,75$), poichè il liquido avendo lo stesso livello nei due rami, la pressione che esso sopporta nel ramo chiuso deve essere eguale a quella dell'aperto.

Indi si versa mercurio in questo finchè il volume dell'aria nell'altro divenga metà del primitivo; si trova che ciò succede quando la differenza del livello del liquido nei due rami è uguale all'altezza barometrica. Ma in tal caso la pressione che l'aria chiusa sopporta è di due atmosfere; una dovuta al peso della colonna barometrica di mercurio, e una dovuta alla pressione atmosferica che si esercita sulla superficie del medesimo nel ramo aperto. Dunque sotto una pressione doppia il volume dell'aria si è ridotto alla metà.

Se il tubo è abbastanza lungo, versando nuovo mercurio si trova che per ridurre l'aria al volume $^1/_3$ del primiero bisogna sottoporlo alla pressione di tre atmosfere, e così di seguito.

4. Prova sperimentale per le pressioni minori dell'atmosferica. — Si dimostra la stessa legge per le pressioni minori di un'atmosfera mediante un tubo barometrico e una vaschetta profonda (fig. 124).

Per fare l'esperienza coll'aria, si riempie di mercurio il tubo barometrico graduato, fino circa ai $^3/_4$, poi si tura l'estremità aperta col dito e lo si capovolge nella vaschetta profonda piena dello stesso liquido, immergendolo in questo finchè il suo livello sia uguale dentro e fuori, e si nota il volume del gas, il quale esercita sul liquido nel tubo la pressione atmosferica. Quindi si solleva questo finchè il volume gazoso sia divenuto doppio. Si trova allora che l'altezza del liquido nell'interno del tubo sul livello esterno è metà dell'altezza barometrica. Ciò dimostra che il volume dell'aria essendo divenuto doppio, la pressione che essa esercita sul mercurio dentro il tubo è divenuta metà, perchè permette il sollevamento di una colonna liquida eguale alla metà di quella barometrica.

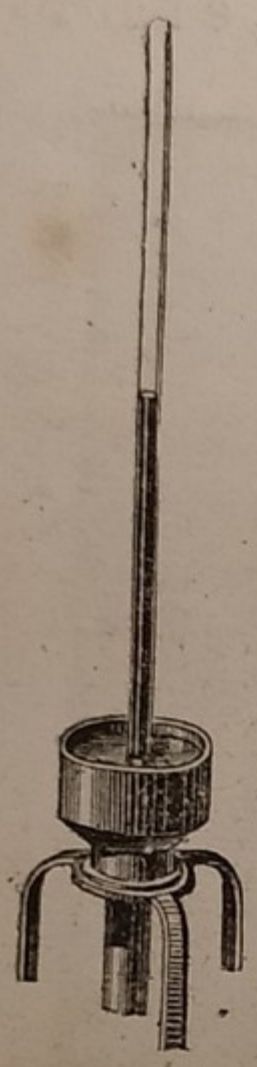


Fig. 124.

Parimenti si potrebbe dimostrare, con un tubo abbastanza lungo ed una vaschetta abbastanza profonda, che il volume dell'aria diventando triplo la sua pressione sulla superficie del mercurio diviene un terzo, perchè permette il sollevamento di una colonna di mercurio eguale a $^2/_3$ della barometrica, ecc.

5. Limiti della legge di Boyle. — Ma le esperienze precedenti che condussero Boyle e Mariotte all'enunciata legge non erano abbastanza precise, perchè in esse non si tenne conto delle ineguaglianze probabili del diametro del ramo chiuso, il quale era supposto perfettamente cilindrico; non si tenne conto delle variazioni della temperatura prodotte dalla compressione della massa gazosa; infine le altezze del mercurio erano misurate coi mezzi imperfetti che allora solo si conoscevano.

Di più quelle esperienze vennero fatte solo per l'aria e fra limiti di pressioni assai ristretti, e si presentava la questione se la legge valesse per qualunque gas e qualunque pressione. Perciò molti fisici fecero successivamente nuove e delicate ricerche intorno a tale argomento.

Dapprima Despretz dimostrò che i vari gaz diminuiscono inegualmente di volume sotto le stesse pressioni, raccogliendoli in canne di vetro capovolte nel mercurio, ed immerse con questo nell'acqua contenuta in un robusto cilindro di vetro. Esercitando sull'acqua una pressione crescente, mediante

uno stantuffo spinto da una vite, egli vide che il mercurio saliva inegualmente nei diversi tubi, e che certi gas, come l'anidride carbonica ($C O_2$), l'idrogeno solforato ($H_2 S$), l'ammoniaca ($H_3 N$), il cianogeno ($C N$), diminuiscono di volume più che l'aria, mentre l'idrogeno presenta diminuzioni di volumi minori di quelle dell'aria.

In seguito (1845) Régnault con apparecchi più perfetti fece molte accuratissime esperienze dalle quali risultò:

1° Che vi sono dei gas i quali alla temperatura ordinaria diminuiscono di volume più di quanto richiede la legge di Boyle; tali sono l'aria, l'azoto, l'anidride carbonica ($C O_2$), ecc., mentre l'idrogeno si comporta inversamente, cioè diminuisce di volume meno di quanto richiede quella legge;

2° Che i vari gas diminuiscono tanto più di volume quanto più si avvicinano alla liquefazione, poichè, come vedremo, tutti i gas, mediante pressione e raffreddamento, si liquefanno;

3° Che quando i gas sono lontani dal punto di liquefazione, le divergenze della loro compressibilità dalla legge di Boyle sono così piccole, che essa si può applicare in pratica senza errore apprezzabile.

6. Espressione algebrica della legge di Boyle. — Rappresentando:

con V, V′ i volumi di una stessa massa di gas,
B, B′ le pressioni corrispondenti,

l'espressione algebrica della legge di Boyle è data dalla proporzione:

$$\frac{V}{V'} = \frac{B'}{B},$$

dalla quale si ricava anche:

$$V B = V' B',$$

ossia: *il prodotto della pressione pel volume è costante per una massa determinata di gas*, supposta costante la temperatura.

Siccome poi il volume occupato da una data massa è inversamente proporzionale alla densità (pag. 30), ossia siccome:

$$\frac{D'}{D} = \frac{V}{V'},$$

ne consegue anche:

$$\frac{D'}{D} = \frac{B'}{B},$$

ossia: *a temperatura costante la densità di una massa determinata di gas è proporzionale alla pressione che subisce.*

§ 69. Manometri.

1. Diverse forme di manometri. — Diconsi *manometri* (*manós*, rado) gli apparecchi che servono a misurare le pressioni dei gas o dei vapori; il che occorre, per es., nelle fabbriche di gas luce, nelle fabbriche d'acque gazose, e sovratutto nelle macchine a vapore.

Si costruiscono manometri di varie forme; le principali sono: il *manometro ad aria libera*, il *manometro ad aria compressa*, e i *manometri metallici*.

2. Manometro ad aria libera, od aperto. — Nella sua forma primitiva consta d'una vaschetta di ferro (*dc*, fig. 125) contenente mercurio, nella quale un tubo (*a*) conduce il gas condensato, mentre un secondo tubo (*b*) di vetro pesca in quel liquido. Il gas o vapore premendo la superficie del mercurio nella vaschetta, esternamente al tubo di vetro, lo fa salire in questo ad altezze:

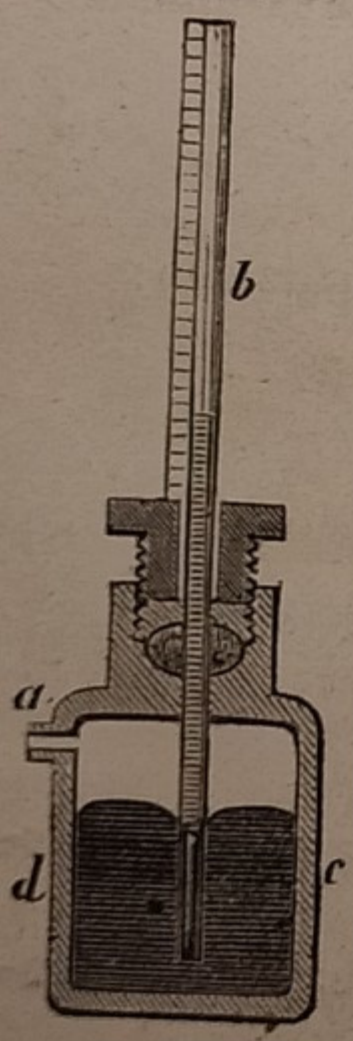


Fig. 125.

$$76 \times 1,\ 76 \times 2,\ 76 \times 3,\ \text{ecc. } cm.$$

sopra il livello della vaschetta, secondochè la sua pressione è di

2, 3, 4, ecc. atmosfere.

In pratica per ovviare all'inconveniente della fragilità che presentano i lunghi tubi di vetro si fa uso di tubi di ferro, e per conoscere l'altezza del mercurio si fa galleggiare su questo un pezzo di ferro attaccato ad un filo passante sopra una carrucolina, e teso da un contrappeso.

Nella torre Eiffel a Parigi, alta 300 metri, venne stabilito un manometro ad aria libera, mediante il quale si possono misurare pressioni di circa 400 atmosfere.

3. Manometro ad aria compressa. — Questo manometro è fondato sulla legge di Boyle, e può essere a pozzetto (fig. 126) o a sifone (fig. 127).

Il tubo è chiuso superiormente e contiene aria secca, o meglio azoto o idrogeno, sia perchè l'ossigeno sotto elevate pressioni è assorbito dal mercurio, sia perchè questo ossidandosi imbratta il tubo.

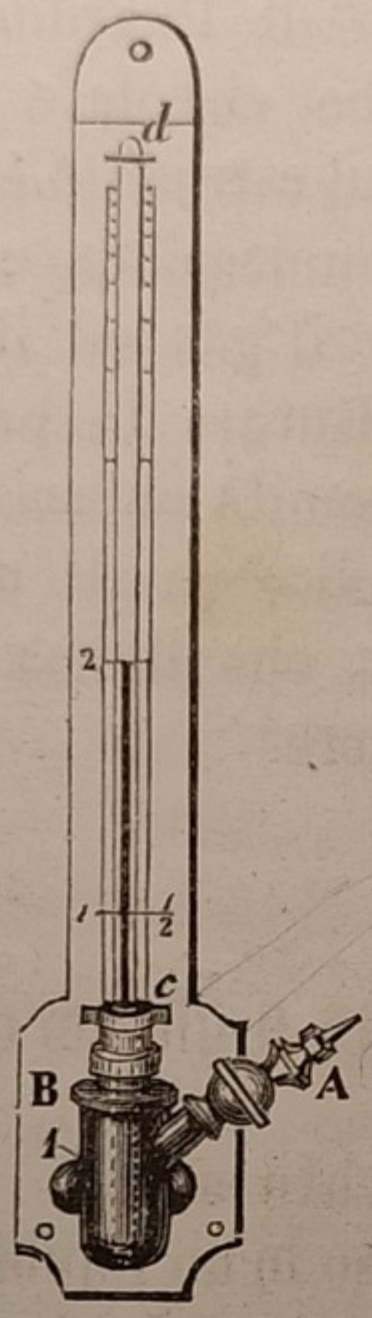


Fig. 126.

Il gas di cui si vuole misurare la pressione si mette in comunicazione col mercurio del pozzetto pel ramo aperto, e così esso fa sollevare il liquido nel tubo chiuso finchè la forza elastica del gas condensato in questo, aumentata dalla pressione idrostatica dovuta alla differenza di livello del mercurio nei due rami, faccia equilibrio alla pressione che esercita il gas sul liquido della vaschetta.

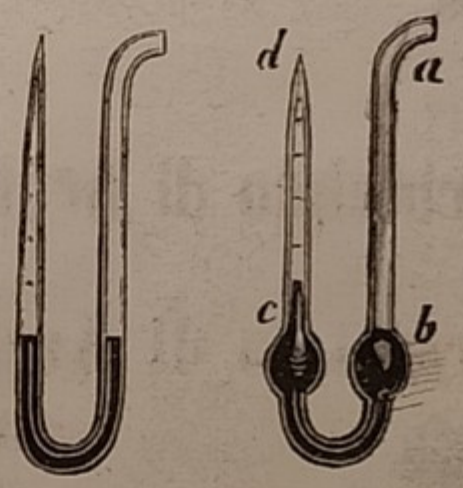


Fig. 127.

Se il tubo è cilindrico, la graduazione del medesimo può essere fatta mediante la legge di Boyle. Ma in pratica si preferisce la graduazione sperimentale, tanto più che il tubo chiuso si fa conico, perchè così le divisioni non vengono troppo vicine a misura che il volume del gas diminuisce.

Si mette il manometro da graduare assieme con un manometro ad aria libera sufficientemente alto in comunicazione con un recipiente a pareti robuste, nel quale mediante una pompa di condensazione si fa crescere la pressione, e si scrivono sulla scala del primo le indicazioni date dal secondo manometro.

4. Manometri metallici. — Nelle industrie si usano oggidì di preferenza i manometri metallici, i quali sono analoghi ai barometri metallici.

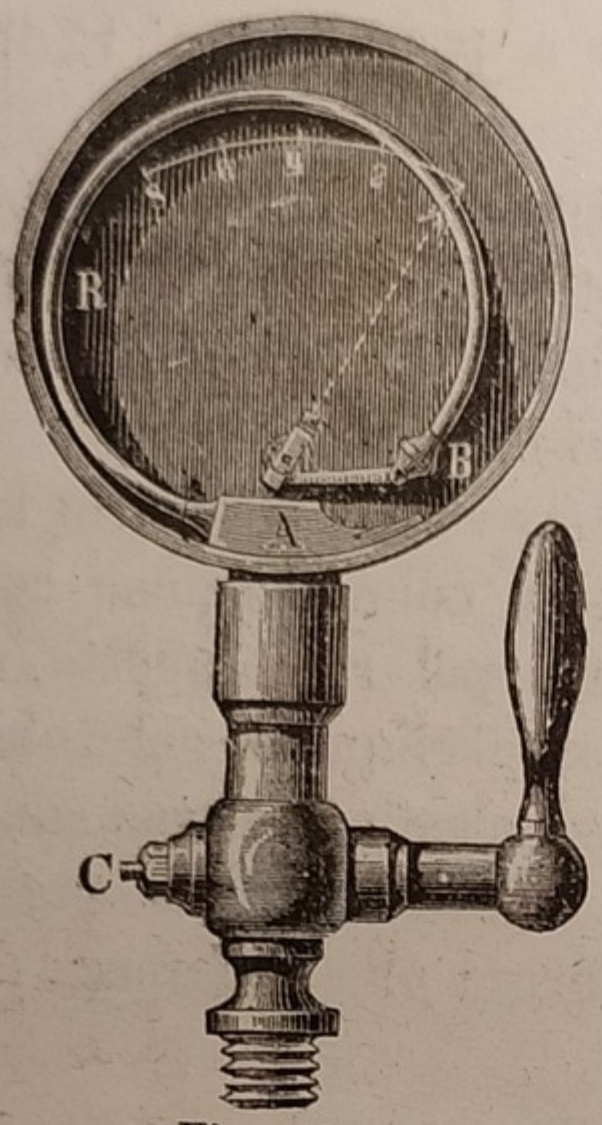


Fig. 128.

Il manometro metallico di Schinz, dai Francesi detto di Bourdon, è costituito da un tubo circolare ricurvo (B fig. 128), una cui estremità è aperta, e si mette in comunicazione col recipiente che contiene il gas od il vapore di cui si vuole misurare la pressione, mentre l'altra estremità chiusa e libera fa muovere un indice su di una graduazione a misura che il gas interno al tubo lo fa svolgere.

§ 70. Il principio di Archimede nei gas e gli aerostati.

1. Il principio di Archimede applicato ai gas. — Come un corpo immerso in un liquido prova una spinta dal basso in alto eguale al peso del liquido di cui occupa il posto, (pag. 174) così un corpo immerso nell'aria o al altro gas, prova una spinta eguale al peso del volume di gas di cui occupa il posto; cioè il principio di Archimede vale anche pei corpi immersi nei gas.

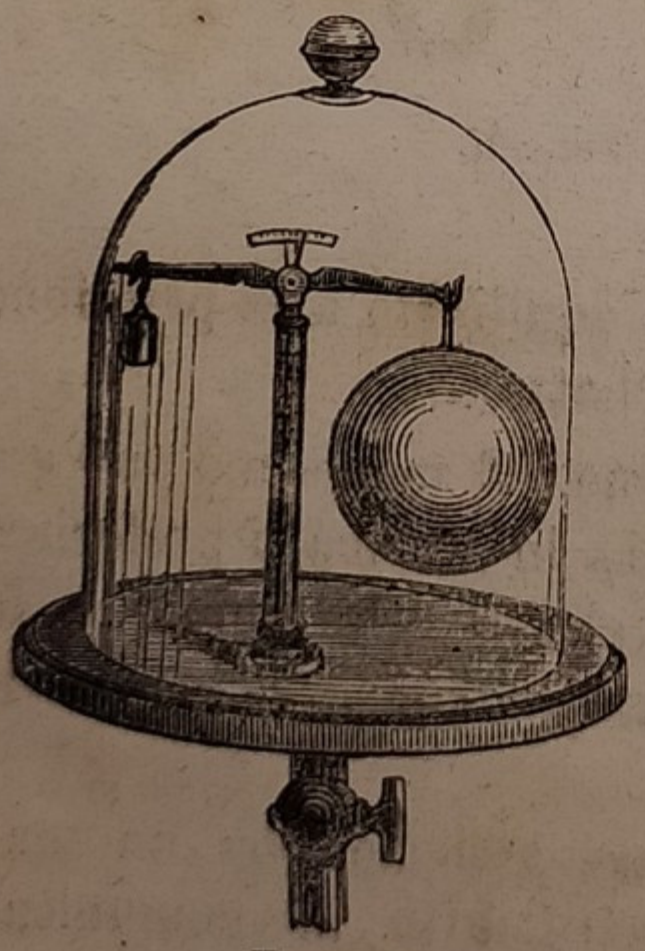


Fig. 129.

2. Baroscopio. — Si dimostra sperimentalmente la perdita di peso dei corpi nell'aria, mediante un apparecchio detto *baroscopio* (fig. 129). Esso consiste in un piccolo giogo di bilancia a cui, invece dei piatti, sono appese due palle metalliche, una piccola massiccia, e l'altra grande vuota, le quali nell'aria si fanno esattamente equilibrio. Ma se si pongono sotto una cam-

pana e poi si rarefà l'aria, si vede la palla di maggior volume abbassarsi tanto più quanto è maggiore la rarefazione.

Il che dimostra che la palla di maggior volume nel vuoto pesa più che la piccola, e che l'equilibrio nell'aria avviene perchè la prima prova una spinta maggiore della seconda.

3. Peso dei corpi nell'aria. — Quindi pesando un corpo nell'aria non si ha il suo peso reale se non nel caso in cui il suo volume è eguale a quello che gli fa equilibrio, essendovi allora spinta da ambe le parti. Ma se il volume del corpo è eguale a quello delle unità di peso, il suo peso specifico deve essere eguale a quello di tali unità, ossia deve essere della stessa materia di queste. Fuori di tal caso, i corpi, a parità di peso avendo diverso volume, ne perdono nell'aria una diversa frazione, epperciò le pesate ordinarie fatte in quel fluido non sono esatte.

Quindi per avere il peso esatto dei corpi, o si debbono pesare nel vuoto, oppure fare la correzione per la loro diversa perdita di peso nell'aria.

Tuttavia tale correzione è solo necessaria nei casi in cui si richiede una somma precisione, ed in cui si tratta di pesare corpi aventi volume molto diverso da quello dei pesi graduati.

4. Equilibrio dei corpi nell'aria. — Come un corpo immerso in un liquido si affonda, resta sospeso, o galleggia, secondochè il suo peso è maggiore, eguale. o minore di quello di un pari volume di liquido (pag. 177), così un corpo immerso nell'aria discende, rimane sospeso, o si solleva, secondochè il suo peso è maggiore, eguale, o minore di quello di pari volume d'aria.

Esempi del 1° caso si hanno nella maggior parte dei corpi, che pesando più di un pari volume d'aria cadono in questa; esempi del 2° e 3° caso si hanno nell'aria che esce dal camino, nel vapore acqueo che esce dalla caldaia, nelle bolle di sapone, e nei palloncini di caucciù pieni di gas idrogeno che servono di trastullo ai ragazzi, come pure nei globi aereostatici, i quali, pesando meno di un pari volume d'aria, si sollevano in essa, finchè giungendo negli strati aerei superiori, che per essere meno premuti hanno minore densità di quelli inferiori, rimangono sospesi perchè il peso dell'aria spostata eguaglia il peso del corpo.

Però se l'involucro non è impermeabile al gas interno e all'aria esterna, ben presto avviene che i due fluidi si diffondono

l'uno nell'altro; allora il gas coll'involucro, pesando più dell'aria spostata, ricade.

5. Gli **aerostati** sono globi di carta, o di stoffa, i quali contenendo un gas specificamente più leggiero dell'aria, siccome l'aria calda o il gas idrogeno, si sollevano nell'atmosfera.

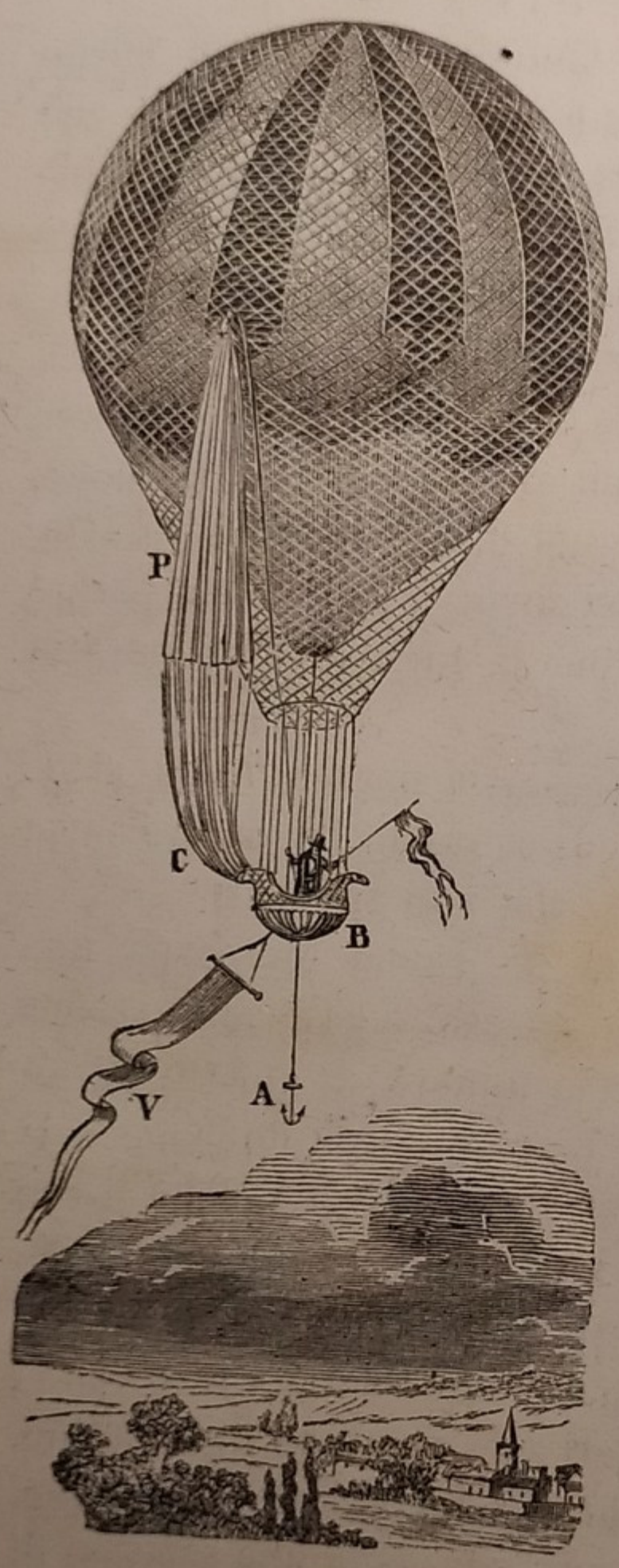


Fig. 130.

Quelli di carta sono ripieni di aria calda, che si ottiene bruciando al disotto della loro bocca inferiore, carta, paglia, legna, e poi si mantiene rarefatta per un certo tempo mediante una spugna imbevuta di alcool o petrolio ed accesa che si colloca in un leggiero cestello di filo metallico sottostante a quella. Essi chiamansi *Mongolfiere*, perchè inventati dai fratelli Montgolfier (1782).

Charles, professore di fisica a Parigi, sostituì (1783) all'aria calda il gas idrogeno; quindi i palloni a gas idrogeno denominansi *Carliere*.

Il loro involucro (fig. 130) è formato con fusi sferici di seta, cuciti insieme, ed è imbevuto di una soluzione di caucciù nel solfuro di carbonio, per renderlo il più possibile impermeabile ai gas.

Alla sommità vi è una valvola che si può aprire dall'aeronauta mediante una funicella interna, per fare uscire del gas, e diminuire così *la forza ascendente* del pallone, cioè la *differenza fra il peso dell'aria spostata e quello dell'aerostato*.

Questo non deve essere interamente pieno alla partenza, affinchè il gas possa espandersi senza farlo scoppiare, a misura che salendo diminuisce la pressione atmosferica; anzi deve essere

aperto inferiormente affinchè il gas possa uscire quando è interamente gonfio, e non produca lo scoppio del medesimo.

Infine, il pallone è avvolto da una rete alla quale mediante corde è appesa la navicella in cui si collocano i viaggiatori, costituita da una specie di cesto fatto con vimini o con stecche di legno.

Per discendere l'aeronauta tira la funicella colla quale apre la valvola che chiude il pallone superiormente e ne fa uscire del gas. Per allentare o sospendere la caduta, ovvero per risalire, getta via della zavorra, cioè della sabbia contenuta in sacchetti che egli prese seco a tale scopo. Per discendere a terra si fa pure uso di un'àncora attaccata ad una fune che si lascia discèndere fino al suolo, quando si è vicini al medesimo, affinchè si aggrappi a qualche ostacolo. Allora l'aeronauta può far discendere il pallone lentamente lasciando uscire del gas.

Nella scienza si adoperano i globi aerostatici per ricercare la diminuzione della pressione atmosferica e della temperatura coll'altezza; per studiare le correnti aeree, l'elettricità atmosferica, acc.

§ 71. La macchina pneumatica.

1. Macchina pneumatica ad un solo cilindro. — La *macchina, o pompa pneumatica, serve a rarefare l'aria in un recipiente.*

Nella sua forma più semplice consiste in un corpo di pompa, o cilindro cavo (VV′ fig. 131) (*) nel quale è mobile su e giù uno stantuffo, costituito da una serie di dischi di cuoio sovrapposti e compressi fra due dischi metallici estremi, di diametro alquanto minore di quelli, affinchè non tocchino le pareti del cilindro. Lo stantuffo è forato, e munito di una valvola (**) (V) che si apre

---

(*) Come modello di questa pompa pneumatica ad un solo cilindro può anche servire la pompa idraulica aspirante, cioè che solleva l'acqua per sola aspirazione fig. 139), perchè in essa si ha la stessa disposizione di valvole, e basta supporre che il tubo di aspirazione invece di pescare nell'acqua vada in un recipiente di cui aspira l'aria.

(**) Si dice *valvola* o *valvula* una parete mobile che serve a chiudere ed aprire alternativamente e automaticamente un foro; tale è, per es., quella lamina di cuoio che apre e chiude la bocca dell'assicella inferiore dei soffietti o mantici.

solo dal basso in alto. Alla base del cilindro trovasi un'altra valvola (V′) mobile nello stesso senso, la quale apre e chiude il canale pel quale il cilindro comunica col recipiente in cui si fa la rarefazione.

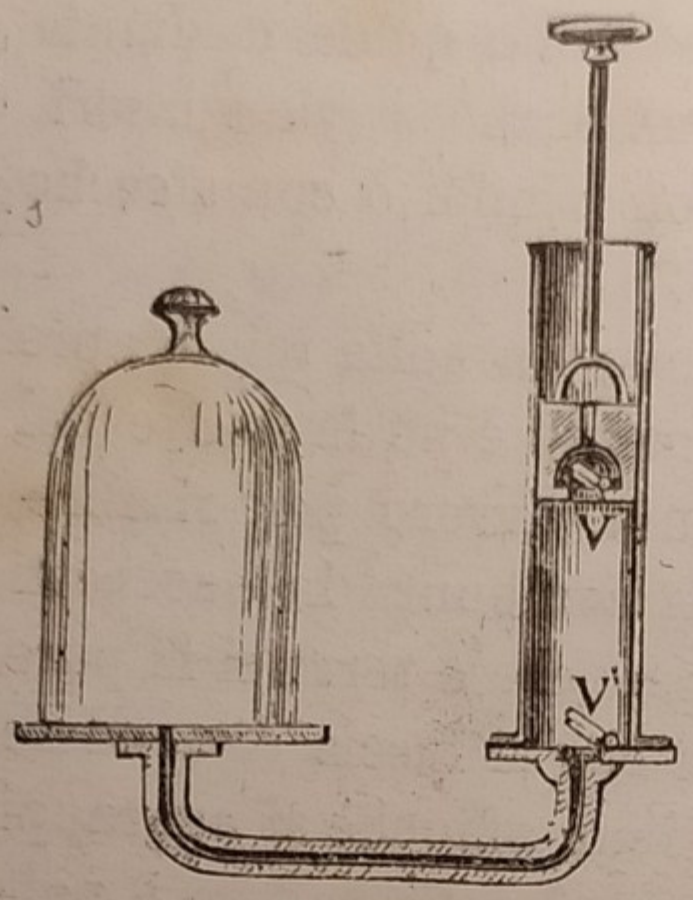


Fig. 131.

Quando si solleva lo stantuffo, la sua valvola si chiude per la pressione atmosferica che agisce superiormente, mentre l'aria che si trova nel recipiente e nel canale solleva la valvola (V′) del fondo del cilindro e penetra in questo; quando invece si abbassa lo stantuffo la valvola inferiore si chiude, perchè l'aria nel cilindro viene condensata, ed essa apre la valvola dello stantuffo per passare al disopra di quello nell'aria libera. Così continuando a sollevare ed abbassare lo stantuffo si rarefà successivamente l'aria nel recipiente. Ma si scorge tosto che in tale macchina la rarefazione non potrà progredire molto innanzi, perchè, quando l'aria nel recipiente non avrà più la forza di aprire essa stessa la valvola del fondo del cilindro, non potrà più passare nel medesimo. Tale difetto è evitato nelle macchine seguenti.

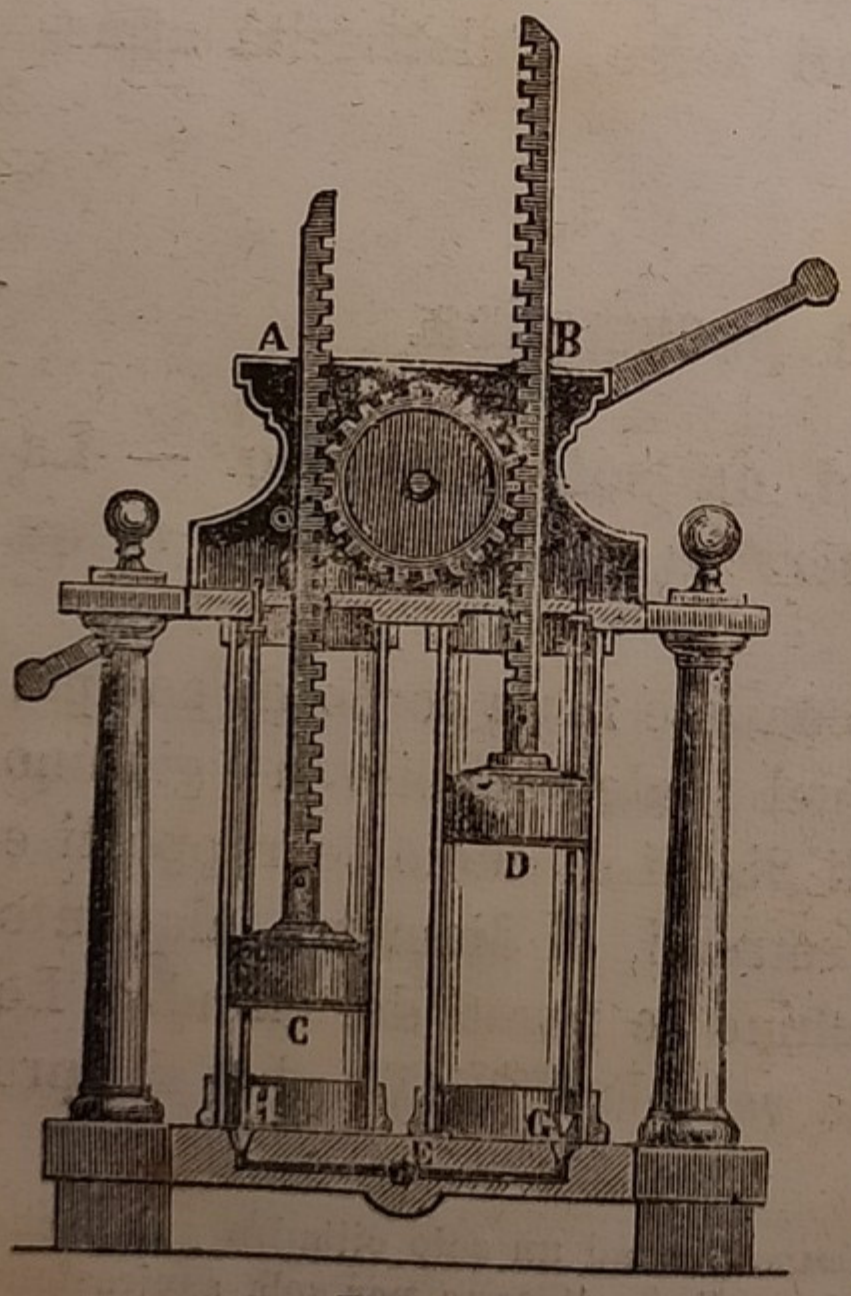


Fig. 132.

2. Macchina pneumatica a due cilindri. — Questa consta di uno o due cilindri di vetro, o metallo, detti *corpi di tromba* (fig. 132, 133), chiusi inferiormente da una lastra metallica nella quale vi è un canale (GEH, fig. 132) per cui essi comunicano fra loro e con un altro canale centrale (E) che mette capo al recipiente (E, fig. 134) in cui si rarefà l'aria (cosicchè i due canali presentano la figura di un T rovesciato, ⊥).

In ciascun cilindro evvi uno stantuffo che viene alternativamente sollevato e abbassato mediante un gambo dentato (A, B, fig. 132) ingranante nei denti di una ruota, o rocchetto dentato, che si fa alternativamente girare alquanto, in un senso e nell'altro, mediante una leva con due manubrii. Ciascun stantuffo

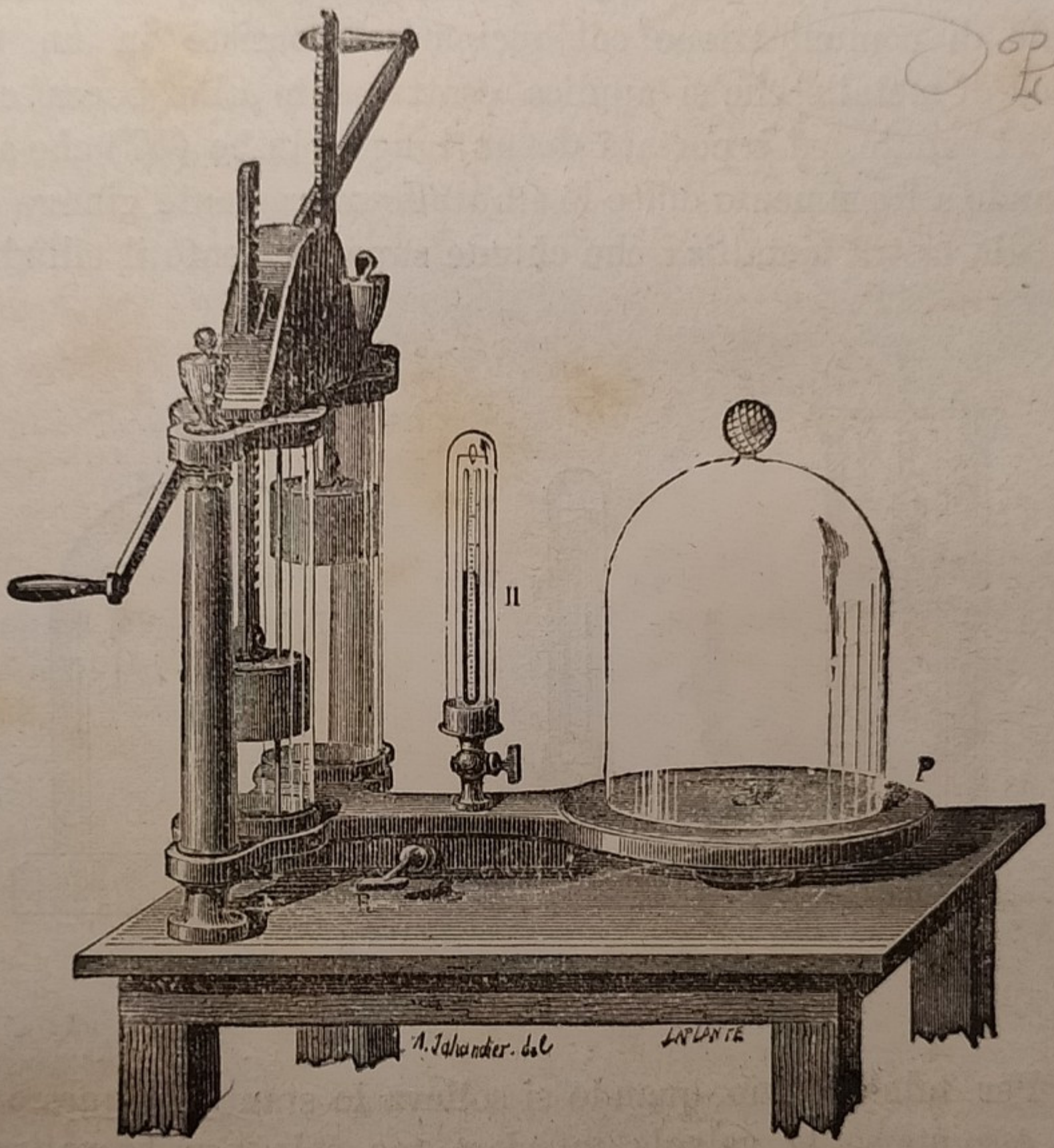


Fig. 133.

è costituito da una serie di dischi anulari di cuoio (CC, fig. 135), imbevuti di grasso, compressi fra due dischi metallici estremi (PQ, NM) di diametro alquanto minore dei primi.

Infine in ciascun cilindro vi sono due valvole, le quali si aprono ambedue dal basso in alto, e sono collocate, l'una (*a* fig. 135) nel canale interno dello stantuffo, e l'altra (*b*) alla base di ciascun cilindro, ove sbocca il canale che lo mette in comunicazione col recipiente in cui si fa la rarefazione.

La valvola (a) dello stantuffo consiste in un disco metallico che tura perfettamente un piccolo foro che attraversa la base inferiore dello stantuffo stesso; essa è munita di un piccolo gambo, impegnato nel canale centrale dello stantuffo, ed è ancora trattenuta a posto da una piccola molla spirale.

La valvola (b) che chiude in ciascun cilindro la bocca del canale di comunicazione col recipiente consiste in un tappo conico di metallo che si applica esattamente alla bocca conica di quel canale, ed è portata da un lungo gambo (bT) che attraversando a fregamento dolce lo stantuffo soprastante giunge quasi fino alla lastra metallica che chiude superiormente il cilindro.

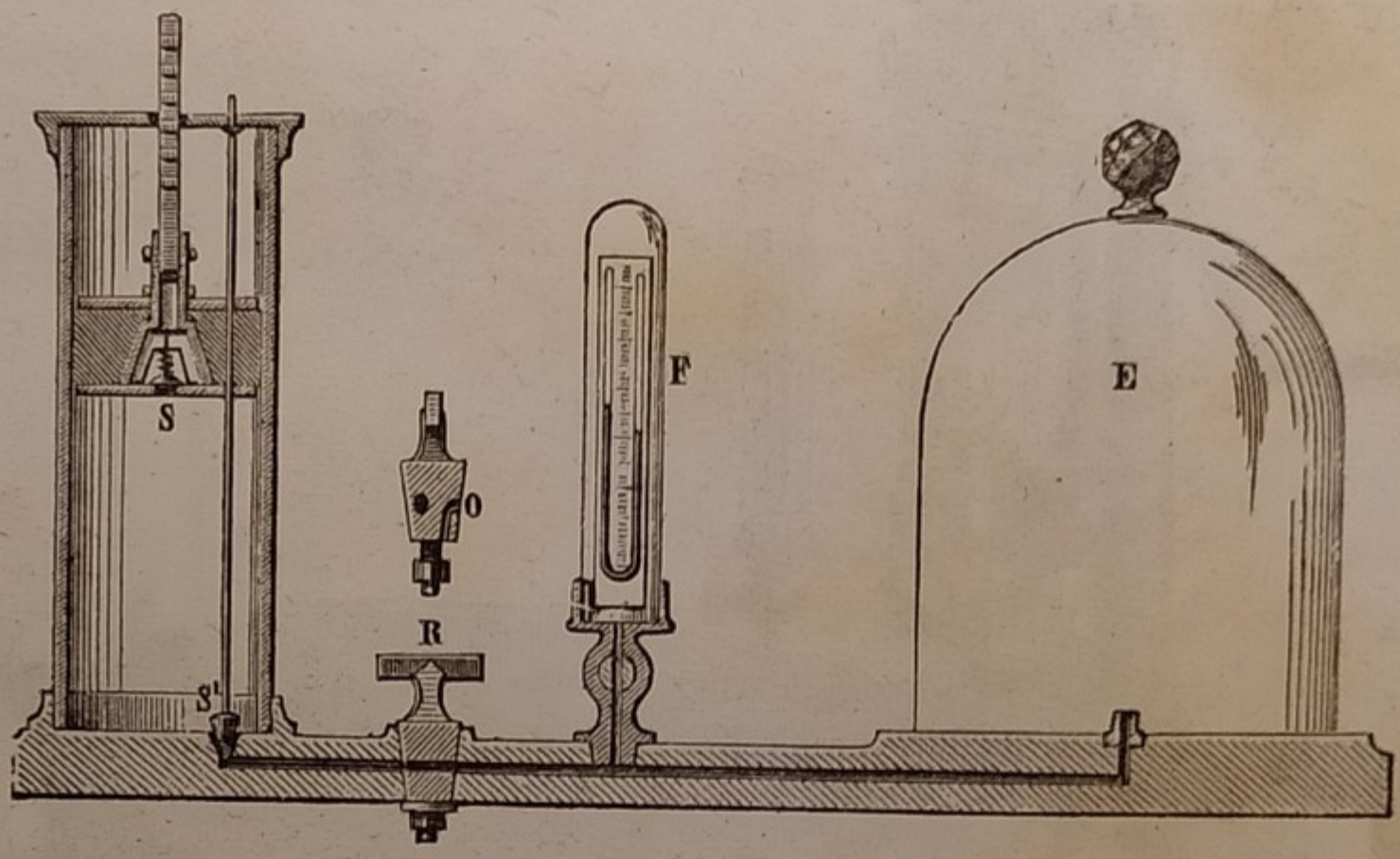


Fig. 134.

Per tale artifizio, quando si solleva lo stantuffo, questo solleva esso stesso la valvola inferiore, ma solo per breve tratto, sufficiente a stabilire la comunicazione fra il cilindro e il recipiente, perchè l'estremità superiore del gambo ne incontra tosto il coperchio, e lo stantuffo sale scorrendo lungo di quello. Così la valvola (b) viene aperta automaticamente.

3. Funzione della macchina. — Quando uno stantuffo (C, figura 132) viene sollevato, esso che chiude ermeticamente il cilindro in cui è contenuto lascia sotto di sè il vuoto; l'aria esterna sovrastante non può penetrare sotto il medesimo, perchè essa preme la sua valvola dall'alto in basso, e la costringe a chiudere ermeticamente il foro in cui si trova, mentre al con-

trario per quel sollevamento viene aperta la valvola (H) del fondo del cilindro, cosicchè l'aria del recipiente può espandersi in esso, sotto lo stantuffo. Quando invece questo scende, spinge, mediante il gambo, la valvola conica (H) nella bocca del canale di comunicazione del corpo di tromba col recipiente, e la tura, cosicchè l'aria non può rientrare in questo, ma viene condensata sotto lo stantuffo, ne apre la valvola e passa superiormente all'esterno.

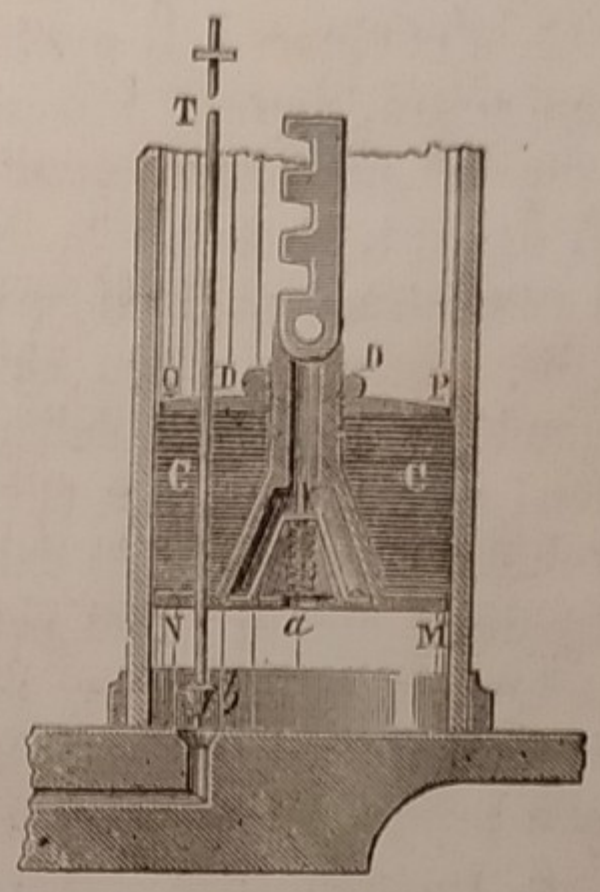


Fig. 135.

Così ad ogni sollevamento ed abbassamento di ciascun stantuffo si estrae una parte dell'aria contenuta nel recipiente.

4. Notizie accessorie. — I canali (H, G, fig. 132) che partono dal fondo dei due cilindri si riuniscono in un solo (E) che mette capo (fig. 133 e 134) al centro di un piatto di vetro, piano e smerigliato, sul quale si possono collocare campane ad orlo pure smerigliato, cui si applica ancora una pasta composta di cera e sevo per impedire il passaggio dell'aria. L'estremità del detto canale termina con un bottone a vite per potergli avvitare recipienti muniti anche essi di una corrispondente scanalatura interna a vite.

L'accoppiamento di due cilindri presenta nella macchina descritta un duplice vantaggio. Dapprima l'estrazione dell'aria dal recipiente è duplicata; poi mentre nelle macchine a un solo cilindro la forza necessaria a sollevare lo stantuffo cresce a misura che l'aria viene rarefatta nel recipiente, e quando il vuoto è quasi completo si deve vincere una pressione di circa un'atmosfera, cioè di 103 *kg.* per decimetro quadrato, invece nella macchina a due cilindri, quando i due stantuffi sono l'uno in basso, e l'altro in alto, la pressione che si oppone al sollevamento del primo, viene, per mezzo del rocchetto dentato, equilibrata da quella che spinge in basso il secondo. Però tale equilibrio ha solo luogo al principio del movimento dei due stantuffi, perchè a misura che uno di essi scende l'aria viene condensata sotto il medesimo fino a superare la pressione atmosferica, condizione necessaria perchè essa passi al di sopra. In tale momento la resistenza provata da uno stantuffo al suo movimento non è più compensata da una eguale e contraria dell'altro, e già prima il compenso viene gradatamente diminuito. Ma più si avvicina al vuoto e più lentamente va crescendo la tensione dell'aria sotto lo stantuffo che discende, per modochè, contrariamente a quanto succede nella macchina ad un solo cilindro (n. 1), la manovra divien tanto più facile quanto più è progredita la rarefazione.

Quindi nelle macchine a un solo corpo di pompa si fa muovere lo stantuffo mediante una leva di 2° genere, come nel torchio idraulico e nelle pompe idrauliche in genere.

5. Provino. — Il grado della rarefazione viene misurato mediante un manometro, detto il *provino*, che consiste in un piccolo barometro a sifone, i cui due rami sono eguali, ma hanno solo l'altezza di circa 30 centimetri (F, fig. 134; H, fig. 133), contenuto in una campanella comunicante col tubo di comunicazione fra il corpo di pompa ed il recipiente. Il mercurio comincia a discendere nel ramo chiuso del medesimo e sollevarsi nel ramo aperto, quando la pressione dell'aria nel recipiente diviene inferiore a 30 centimetri di mercurio, e a misura che la rarefazione progredisce va scemando la differenza del livello del liquido nei due rami. Essa diverrebbe nulla se si potesse fare il vuoto perfetto.

Le migliori macchine pneumatiche danno una rarefazione di 1 a 2 *mm.* di mercurio nel manometro. Una maggiore rarefazione si può ottenere solo colla *pompa pneumatica a mercurio.*

6. Impossibilità del vuoto perfetto. — Colle macchine anche le più perfette non si può mai ottenere un vuoto assoluto per parecchie ragioni.

1° Lo *spazio nocivo*, cioè lo spazio che rimane tra la base del cilindro e quella dello stantuffo, quando questo è in basso, poichè è impossibile un combaciamento perfetto tra le due superfici, specialmente per la presenza delle valvole. Per tale cagione rimane in detto spazio annicchiata dell'aria che non passa al di sopra dello stantuffo nell'abbassamento di questo, e poi col sollevamento del medesimo essa si espande nel cilindro, e quando la sua forza espansiva è eguale a quella dell'aria nel recipiente non avviene più passaggio di aria da questo nel cilindro, e quindi rarefazione.

2° Le chiusure non possono essere assolutamente ermetiche, e tanto meno quanto maggiore è la rarefazione.

3° L'olio che viene versato sopra lo stantuffo per lubrificarlo, spinto dalla pressione dell'aria sovrastante, quando quello si solleva, passa in parte al di sotto del medesimo e lascia poi sprigionare l'aria che tiene disciolta.

4° Ma quando anche non esistessero le cause sopra accennate vi è un'*impossibilità matematica* del vuoto perfetto, la quale risulta dalle seguenti considerazioni.

Supponiamo dapprima, per semplicità, che con un solo corpo di tromba debbasi fare il vuoto in un recipiente di capacità uguale al volume compreso sotto lo stantuffo quando questo è al sommo della sua corsa. Sollevandolo metà dell'aria che è nel recipiente passa nel cilindro, e coll'abbassamento del medesimo va nell'atmosfera. Parimenti con un secondo colpo di stantuffo si estrae dal cilindro la metà dell'aria rimasta, e così di seguito. Pertanto, nel detto caso, ad ogni colpo di stantuffo, si estrae solo metà dell'aria residua, cosicchè rimane sempre una frazione la quale va ognora diminuendo ma non diviene mai nulla.

Siccome poi, in generale, la capacità del recipiente in cui si fa la rarefazione è maggiore di quella del cilindro, ne risulta che ad ogni solleva-

mento ed abbassamento dello stantuffo si estrae una frazione dell'aria del recipiente minore della metà, epperciò la rarefazione procede più lentamente.

7. Macchina pneumatica a mercurio. — Infine per quanto si sieno immaginati artifizi per diminuire l'effetto dello spazio nocivo, nessuno può competere colla *macchina pneumatica a mercurio*, che lo sopprime affatto, e mediante la quale si fa il vuoto barometrico in un recipiente.

Perciò si mette parecchie volte questo in comunicazione con una bolla di vetro in cui viene fatto replicatamente il vuoto barometrico, perchè essendo collocata alla sommità di un tubo barometrico si può in essa fare alternativamente salire e discendere il mercurio. Così con una manovra alquanto lunga si può spingere la rarefazione ad un punto tale che nel provino comunicante col recipiente in cui si è fatto il vuoto il mercurio si riduce sensibilmente allo stesso livello nei due rami. Ciò malgrado non risulta ancora il vuoto perfetto od assoluto, perchè ad ogni rarefazione non si estrae che una frazione dell'aria lasciatavi dalla rarefazione precedente, e poi rimane sempre il vapore di mercurio e un poco dei vapori emananti dai corpi grassi coi quali bisogna ungere le chiavette.

§ 72. Pompa di condensazione e di rarefazione dei gas.

1. Descrizione. — La pompa di condensazione e rarefazione, detta anche di Gay-Lussac, serve a condensare, o a rarefare l'aria, o altro gas, in un recipiente.

La figura 136 ne rappresenta una forma alquanto antica, mentre la figura 137 rappresenta quella più perfezionata, e infine la figura 138 mostra la parte inferiore e più importante della sua sezione.

La descrizione della seconda si applica anche alla prima e permette d'intendere il suo perfezionamento rispetto alla medesima.

Essa consta di un cilindro metallico o corpo di pompa (figura 137), comunicante inferiormente con due tubi, uno di aspirazione (C), il quale va al recipiente che contiene il gas da aspirare, ovvero nell'aria libera se si vuole aspirare e condensare questa, e l'altro di efflusso (D*d*) comunicante col recipiente in cui si fa la condensazione; uno stantuffo cieco (S), cioè, non forato, è mobile su e giù nel cilindro; infine due valvole metalliche coniche (fig. 138), sono applicate; l'una (a destra), alla bocca del tubo di afflusso (C) del gas nel cilindro, la quale si apre solo verso l'interno di questo, l'altra (a sinistra) applicata alla bocca

del tubo di efflusso (D), la quale si apre solo dall'interno verso l'esterno del cilindro. Ciascuna valvola è impedita di spostarsi lateralmente da un gambo di cui è fornita, il quale è impegnato in un canale praticato in una lastra metallica convenientemente collocata al di sotto, ed è ancora trattenuta a posto da una piccola molla a spirale.

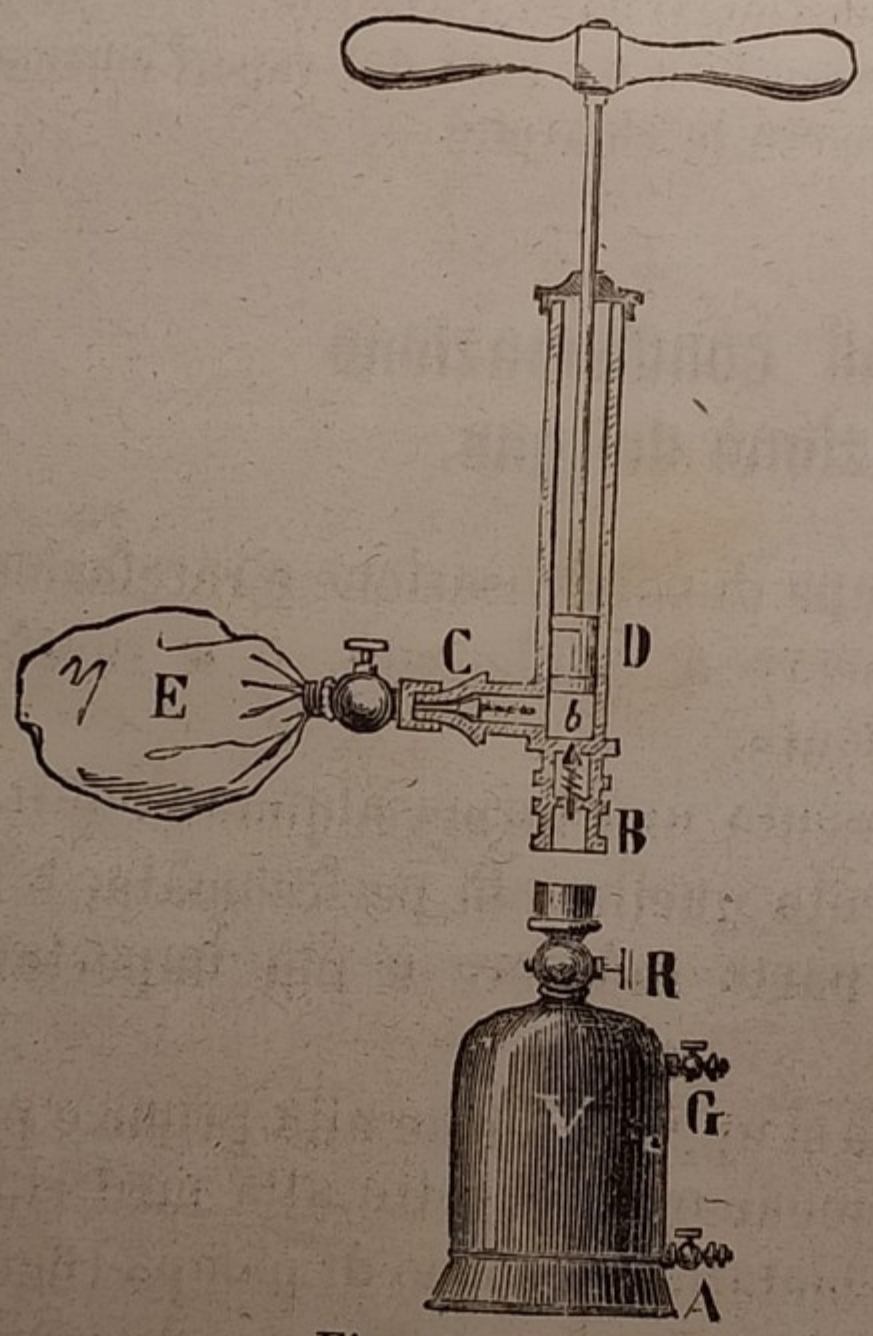


Fig. 136.

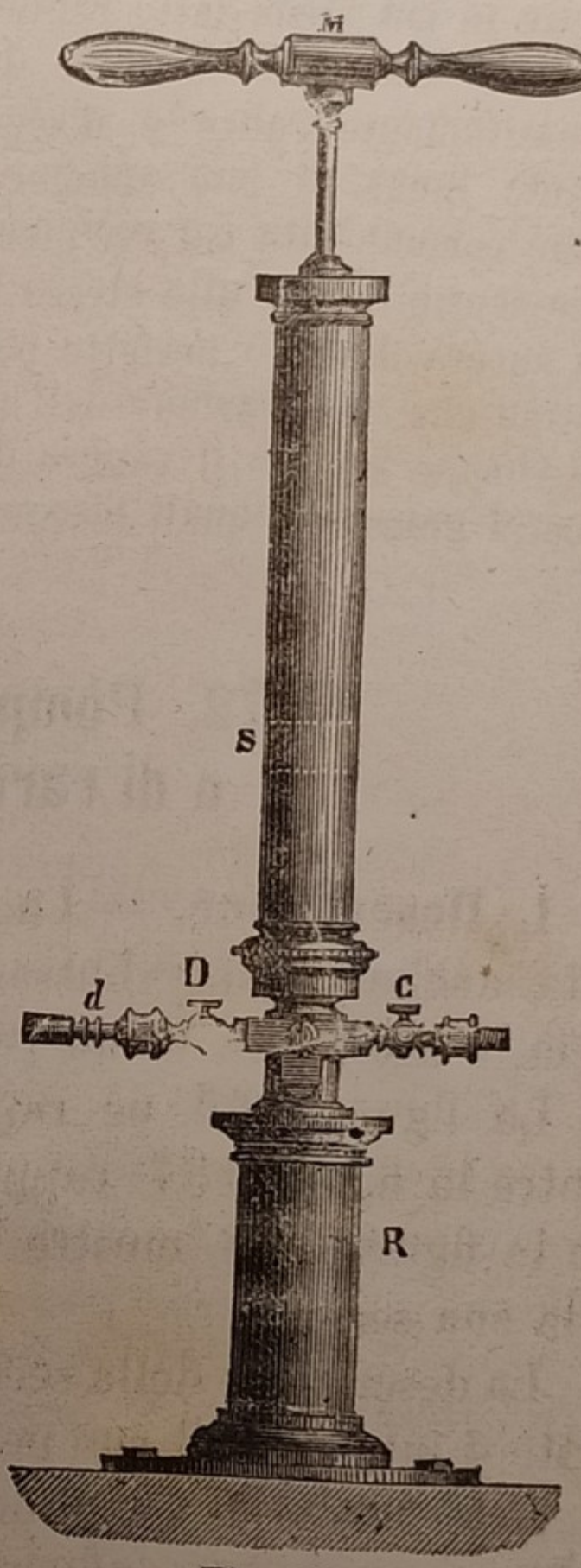


Fig. 137.

2. Funzione dell'apparecchio. — Per mettere in azione la macchina si posa sul suolo e si pongono i piedi sulle due sporgenze laterali inferiori della base (R, fig. 137), indi si prende il manubrio colle due mani e si solleva ed abbassa alternativamente lo stantuffo.

Nel sollevamento, esso lascia il vuoto al di sotto, e perciò il gas, con cui comunica il tubo di afflusso (C), ne apre la valvola

(a destra) e penetra nel cilindro. Indi abbassando lo stantuffo, il gas entrato in quello viene condensato e colla sua pressione chiude la valvola del tubo di afflusso (C), mentre apre quella (a sinistra) del tubo di efflusso (D), ed entra nel recipiente, aprendo anche la valvola di cui questo è fornito, affinchè il gas condensato nel medesimo non possa scappare.

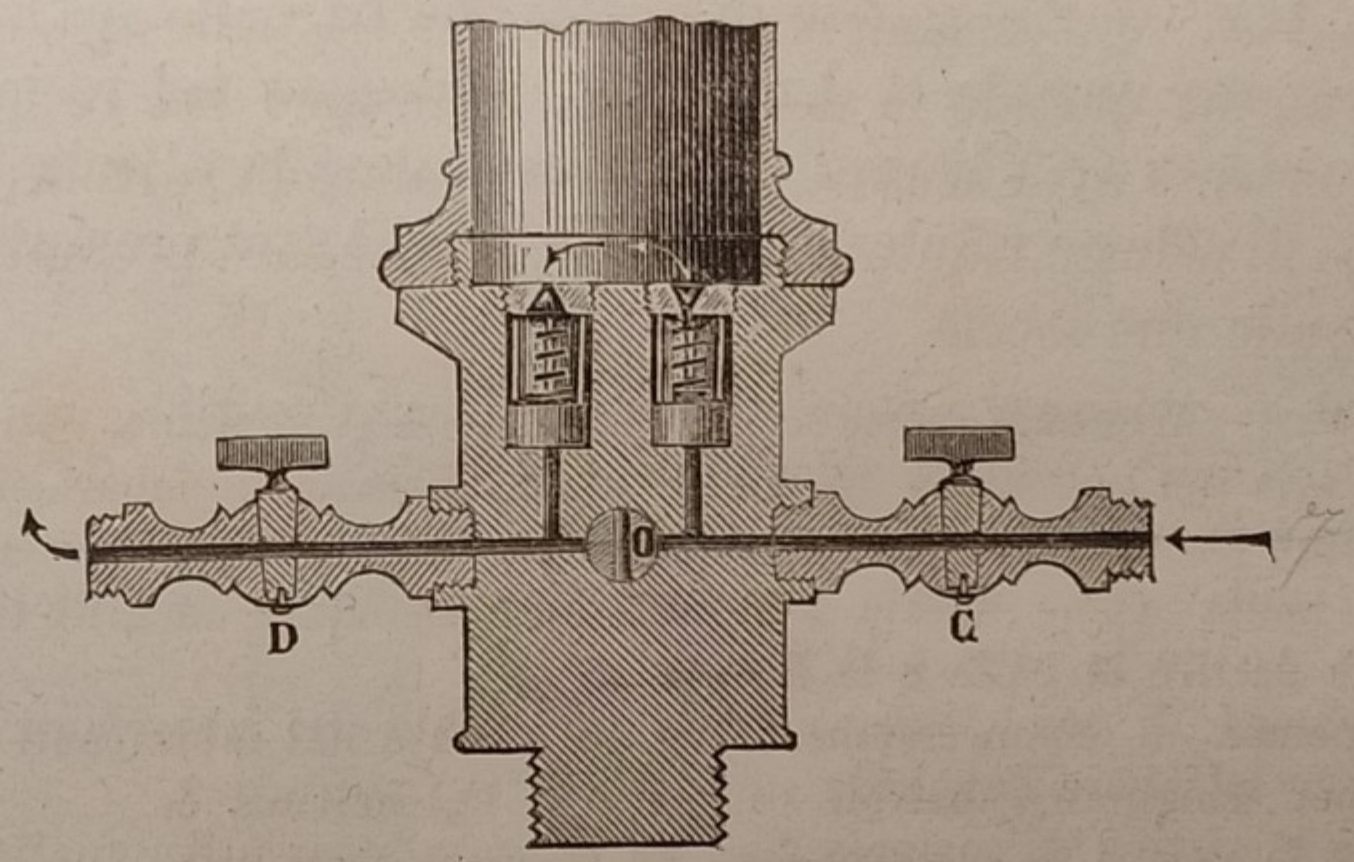


Fig. 138.

Insomma, se due recipienti sono messi in comunicazione coi detti tubi (D e C) di efflusso ed afflusso, il primo riceve ad ogni colpo di stantuffo il gas preso nel secondo; quello si riempie, mentre questo si vuota.

L'apparecchio è ad un tempo una pompa aspirante o di rarefazione, e premente o di condensazione dei gas.

I due canali sono muniti di chiavette (C, D, fig. 138) per chiuderli all'uopo, e una terza (O) collocata fra essi permette di lasciare rientrare il gas nel recipiente in cui si è fatta la rarefazione.

Per dimostrare l'azione condensante della tromba di condensazione si può mettere in comunicazione con un manometro ad aria libera, o compressa, o metallico. E per dimostrare che essa può anche servire a fare il vuoto si può mettere in comunicazione col ramo aperto di un provino simile a quello della macchina pneumatica.

3. Limite dell'azione. — La condensazione è limitata dal così detto *spazio nocivo*, cioè dallo spazio che rimane sotto lo stantuffo, quando esso è al fondo del recipiente, poichè è impos-

sibile il combaciamento perfetto della base di quello col fondo del recipiente o colle valvole.

Se, ad es., lo spazio nocivo è $^1/_{100}$ del volume che rimane nel cilindro sotto lo stantuffo quando è sollevato, il gas arrivato nel cilindro col sollevamento di quello viene, nella discesa dello stantuffo, ridotto ad un volume 100 volte minore, e quindi ad una densità 100 volte maggiore di quella che ha nello spazio da cui si ricava; ma quando la densità del medesimo nel recipiente in cui si condensa avrà acquistato lo stesso valore la valvola (sinistra) del tubo di efflusso rifiuterà di aprirsi, perchè sarà premuta egualmente sulle due faccie.

4. Usi. — Mediante pompe di compressione si gonfiano, ossia si condensa, l'aria nei palloni da giuoco, si spinge l'aria ai palombari, si caricano gli schioppi pneumatici o ad aria compressa, nei quali una valvola premuta da una molla viene aperta per un istante mediante un grilletto, e così quella fa partire la palla o la freccia.

La pompa di compressione viene pure usata dai fabbricanti di acque gazose per sciogliere l'anidride carbonica ($C O_2$) nell'acqua.

Infine la pompa di compressione ha ricevuto assai utile applicazione a scavare le grandi gallerie del Fréjus, del Gottardo, ecc.; ivi le macchine perforatrici delle roccie per le mine vengono mosse non mediante macchine a vapore, che consumano l'ossigeno dell'aria e la rendono asfissiante, ma mediante l'aria compressa, la quale, uscendo poi all'esterno, rinnova quella della galleria. Le macchine ad aria compressa sono costruite analogamente alle macchine a vapore; solo vengono mosse dall'aria compressa a 5 atmosfere invece del vapore acqueo.

§ 73. Le pompe idrauliche.

1. La tromba o pompa aspirante *solleva l'acqua per aspirazione.* Essa è costituita da un cilindro o corpo di pompa (figura 139), munito superiormente di un tubo laterale di efflusso. Nel cilindro è mobile uno stantuffo formato con più anelli di cuoio traversato da uno o due fori chiusi da valvole che si aprono solo dal basso in alto. Infine dal fondo del cilindro scende un *tubo d'aspirazione* che va a pescare nell'acqua che si tratta di sollevare, e la bocca superiore di questo tubo è chiusa da una valvola che si apre pure dal basso in alto.

2. Funzione della pompa. — Se lo stantuffo viene sollevato l'aria sotto il medesimo nel cilindro viene rarefatta, le sue val-

vole restano chiuse per la pressione atmosferica superiore, mentre quella del tubo d'aspirazione si apre per la espansione dell'aria sottostante. Per conseguenza la pressione atmosferica sulla super-

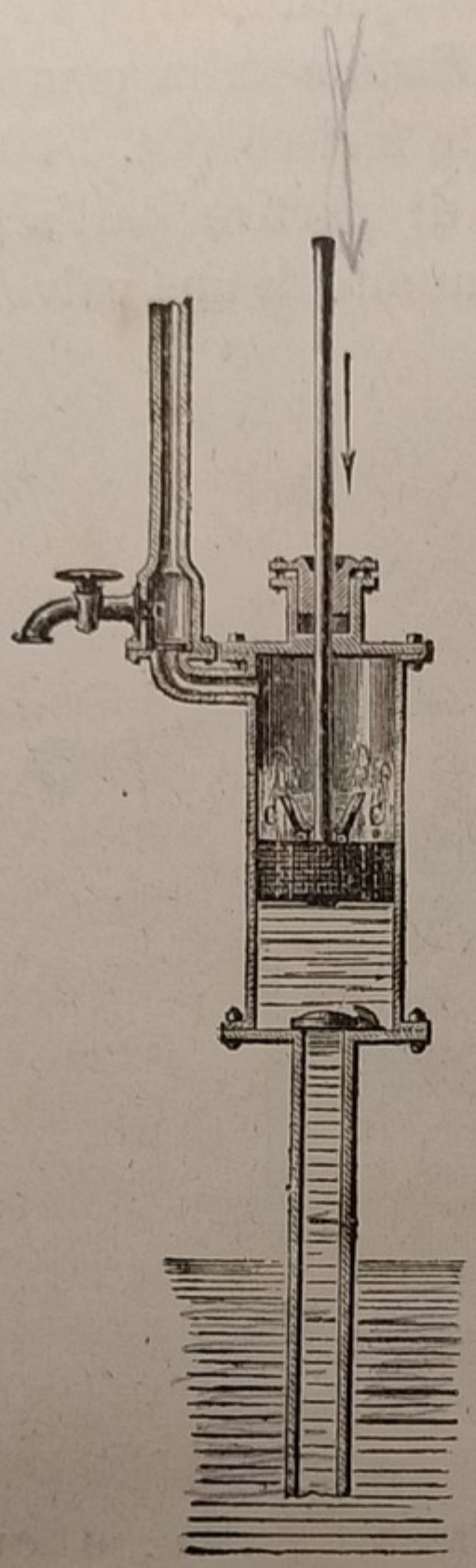


Fig. 139.

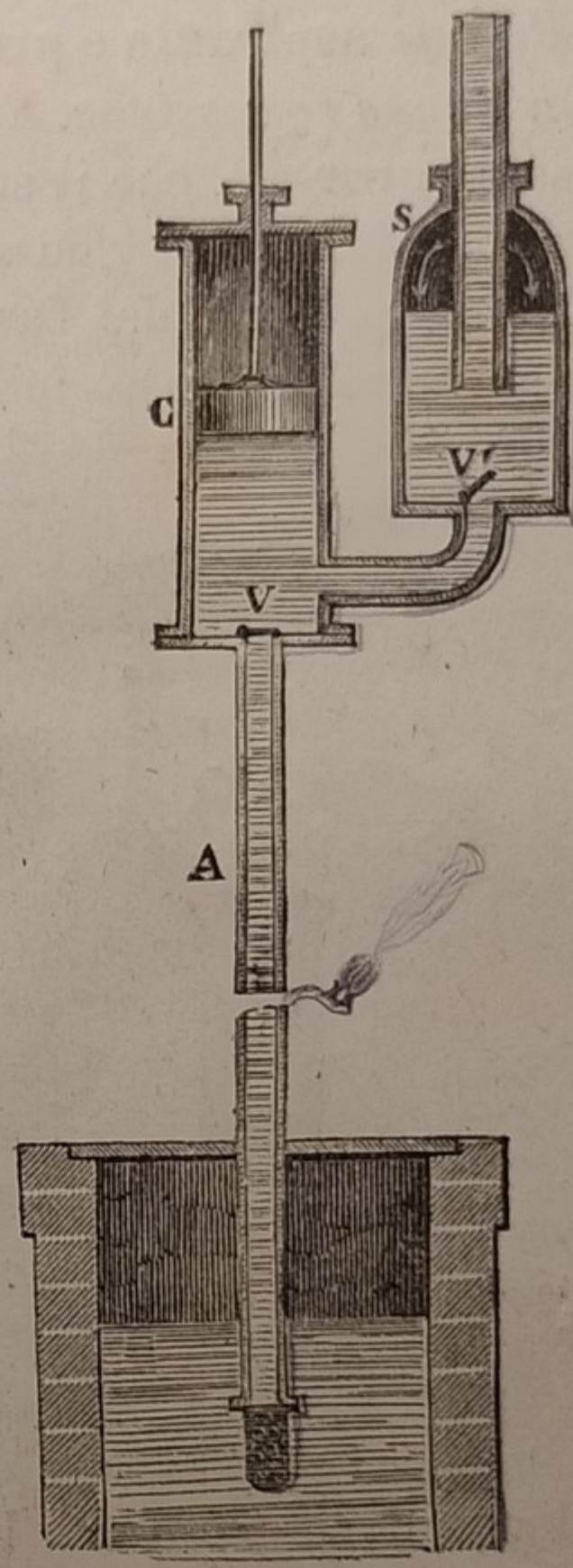


Fig. 140.

ficie esterna dell'acqua la fa sollevare nel tubo. Abbassando poscia lo stantuffo si comprime l'aria nel cilindro, la quale chiude la valvola del tubo d'aspirazione, mentre apre quella dello stantuffo e passa al disopra. Dopo qualche colpo di stantuffo l'acqua entra nel corpo di pompa, ed allora coll'abbassamento di quello essa ne apre la valvola e passa sopra il medesimo; indi nel sollevamento viene portata in alto fino al tubo di efflusso.

Per la pressione atmosferica l'acqua salirebbe nel tubo di aspirazione fino a 10 metri e $^1/_3$ (pag. 208). Ma in pratica non

si può dare al tubo di aspirazione una lunghezza maggiore di 8 metri, in causa dello spazio nocivo, delle fughe inevitabili, e dell'aria che sciolta nell'acqua si svolge col diminuire della pressione, e colla sua tensione preme la superficie dell'acqua.

3. Pompa aspirante e premente. — Questa *solleva l'acqua per aspirazione e pressione.* Essa non differisce dalla pompa premente se non per ciò, che il suo stantuffo è cieco (fig. 140), cioè non forato, e il tubo di efflusso invece di partire dall'alto del corpo di pompa parte dal basso, ed è munito di una valvola (V′) che si apre pure dal basso in alto.

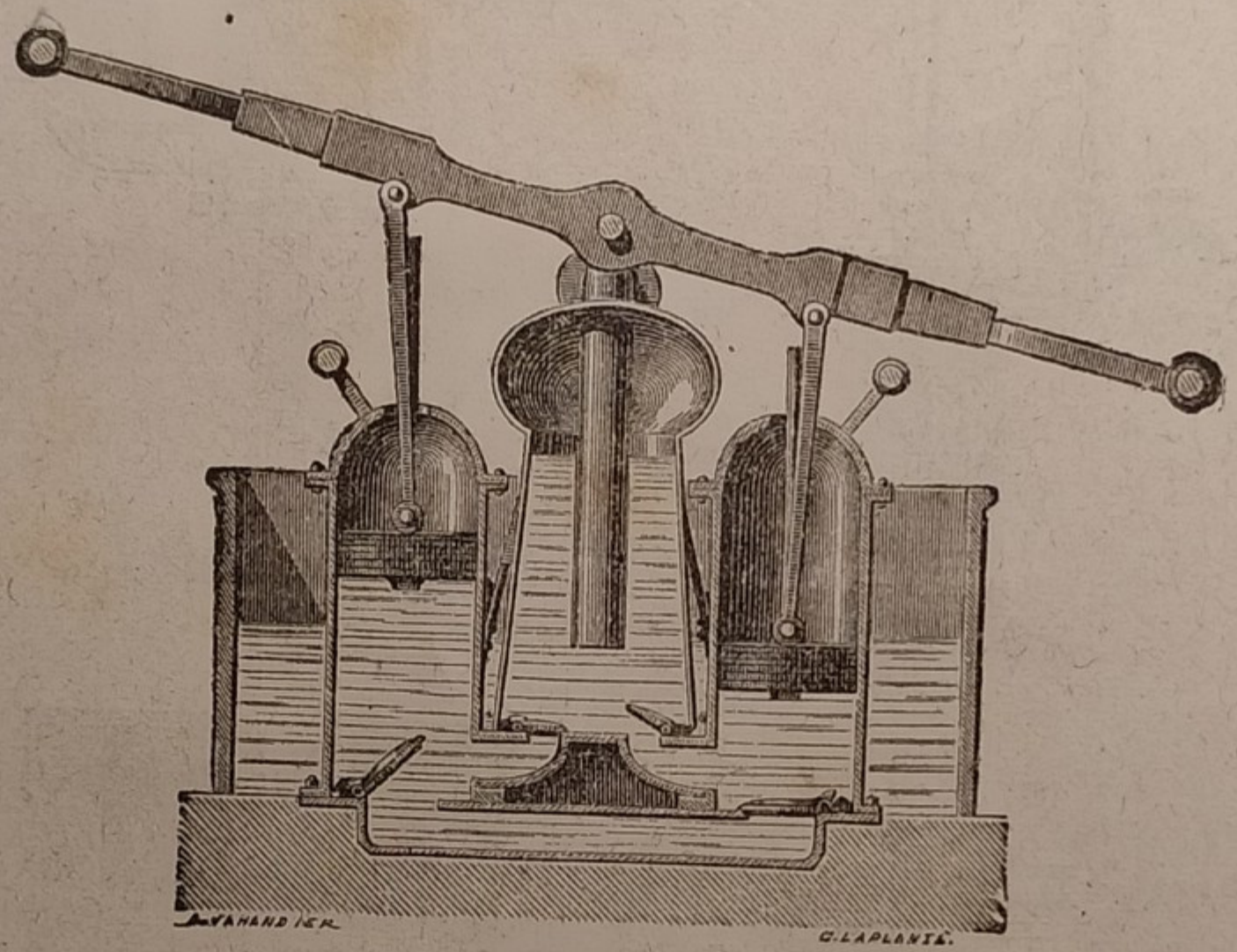


Fig. 141.

Sollevando lo stantuffo l'aria viene rarefatta, e quindi l'acqua sollevata nel tubo d'aspirazione; poscia abbassandolo, l'aria apre la valvola del tubo laterale e va fuori: quando poi l'acqua è giunta nel corpo di pompa, allora essa stessa viene spinta per la pressione dello stantuffo, nel tubo laterale, ad una altezza che dipende solo dalla pressione esercitata con quello.

Però se il tubo laterale è continuo l'efflusso del liquido è intermittente, perchè avviene solo quando lo stantuffo si abbassa. Per ottenere un efflusso continuo si fa arrivare l'acqua spinta dallo stantuffo in un serbatoio, o *camera d'aria* (S), e si restringe il tubo di efflusso in modo che lasci passare meno liquido di quanto ne entra nel serbatoio.

Allora, quando lo stantuffo si abbassa una parte dell'acqua che esso spinge nel tubo di efflusso esce immediatamente, mentre un'altra parte si solleva attorno al medesimo nella camera d'aria premendo questa, la quale alla sua volta, colla sua pressione, spinge poi l'acqua nel tubo di efflusso, quando nell'ascesa dello stantuffo il liquido non è spinto dal medesimo.

4. *La* **pompa per gli incendi** *è un accoppiamento di due trombe prementi.* L'acqua che si versa nella vasca esterna (fig. 141) entra alternativamente nei corpi di tromba pel sollevamento alternato degli stantuffi ciechi, e coll'abbassamento di essi viene spinta nella camera d'aria, ove questa, continuamente compressa, spinge di continuo l'acqua pel tubo di efflusso.

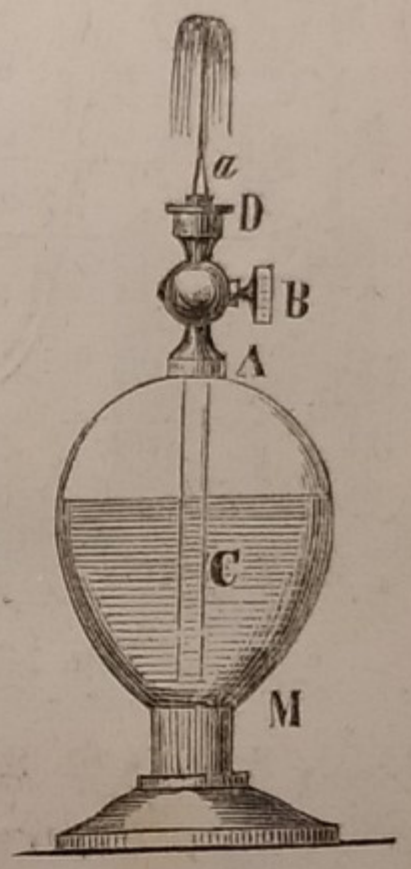


Fig. 142.

5. **Fontana di compressione.** — Condensando con una pompa di compressione l'aria in un recipiente chiuso pieno per $^2/_3$ circa di acqua e munito di cannello che sbocca vicino al fondo e ne esce superiormente, quando si apre la chiavetta di quello l'acqua zampilla per la pressione dell'aria (fig. 142).

§ 74. I sifoni.

1. Sifone ordinario. — Per travasare i liquidi e specialmente il vino da un recipiente in un altro si usa sovente un apparecchio semplicissimo costituito da un tubo di latta, o di gomma, ricurvo ad U (fig. 143), uno dei cui rami si fa pescare nel liquido da travasare, e per altro esterno avviene l'efflusso.

Per usare lo strumento si comincia a caricarlo, cioè a riempirlo di liquido. Perciò si può procedere in due maniere.

Si può capovolgere il tubo colla curvatura in basso e poi versare direttamente il liquido nel ramo più lungo, turando il ramo più corto, quando esso è pieno, per potere anche riempiere il primo. Poscia, turato anche questo, lo si capovolge e si immerge il ramo più corto nel liquido; allora se si apre la bocca dell'altro ramo avviene l'efflusso dal medesimo.

Ovvero si può anche caricare il sifone immergendo direttamente il suo ramo più corto nel liquido del recipiente, e poi applicando la bocca all'orifizio aperto del ramo più lungo si aspira l'aria nel tubo; così la pressione atmosferica sulla superficie del liquido circostante al primo lo fa sollevare nel medesimo, e poi discendere nel secondo. Però in tale modo si riceve del liquido in bocca; il che si può evitare se il ramo più lungo è munito di un tubo laterale (C, fig. 144) pel quale lo si aspira dopo avere turata la bocca inferiore (O) del sifone.

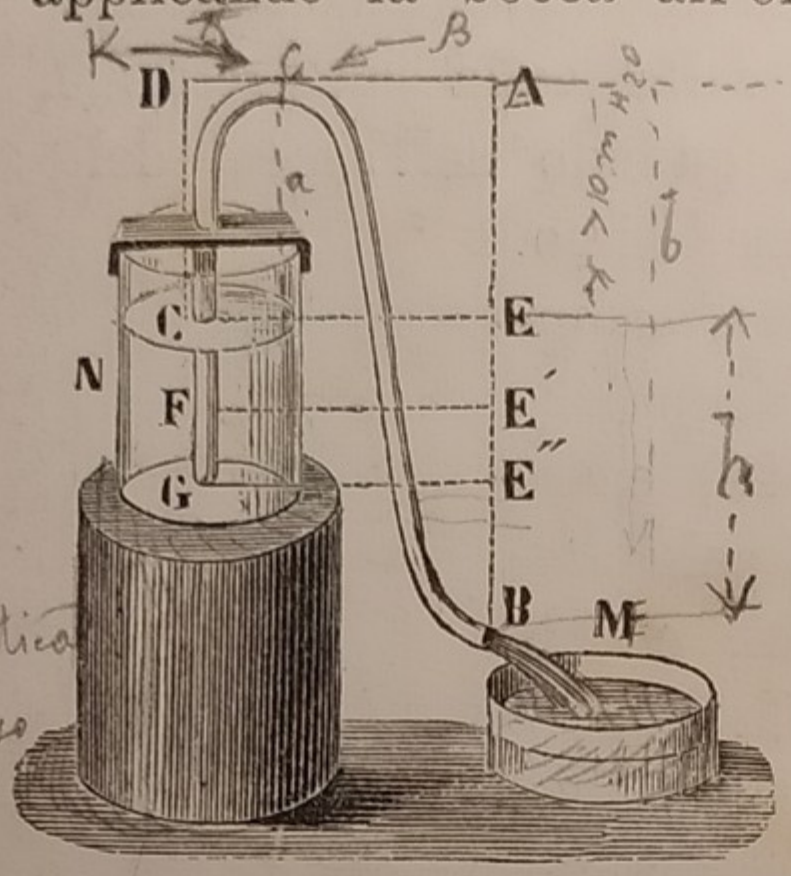


Fig. 143.

Quando lo strumento è caricato, se lo si apre in basso, *il liquido effluisce finchè la bocca del ramo esterno è inferiore al suo livello nel recipiente.*

Il che si può provare sperimentalmente sollevando la bocca di quel ramo fino al detto livello; allora cessa l'efflusso; e se lo si solleva più in alto si vede il liquido venire ricacciato nel recipiente.

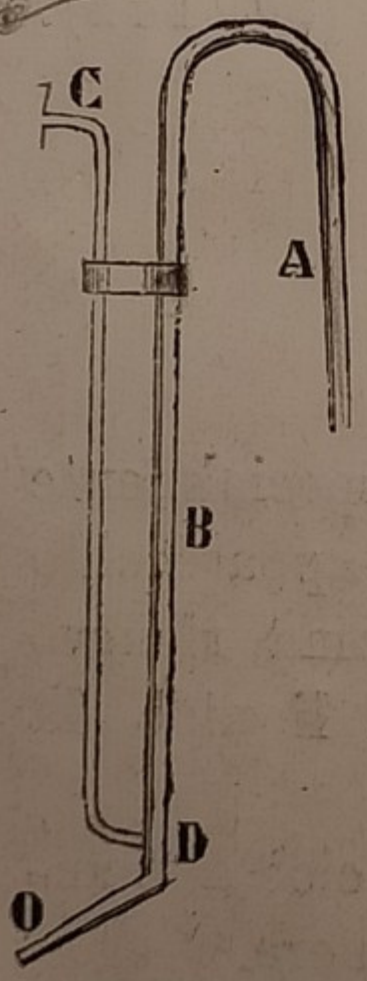


Fig. 144.

Per spiegare la quale condizione dell'efflusso debbonsi considerare le forze che agiscono alla sommità (D A, fig. 143) del sifone, perchè in tale porzione orizzontale del medesimo può solo esservi stabile movimento del liquido verso la bocca esterna (B), quando la forza che lo spinge verso questa è maggiore di quella che lo respinge nel recipiente,

Ora la forza che spinge il liquido ad uscire è evidentemente eguale alla pressione atmosferica P, che agisce sulla superficie del medesimo nel recipiente (N), diminuita dalla pressione che la colonna (D C) sovrastante nella parte emersa del ramo interno esercita in senso contrario su di essa. Dunque rappresentando con i tale pressione della colonna liquida del ramo interno, la forza che spinge il liquido ad uscire è: $P - i$. Invece quella che lo spinge verso il recipiente è la pressione atmosferica P, che agisce alla bocca aperta (B) del ramo esterno al medesimo,

diminuita della pressione che la colonna liquida (A B) contenuta nel detto ramo esercita contro di essa in senso contrario. Rappresentando con e tale pressione del liquido nel ramo esterno, la forza che lo spinge a rientrare nel recipiente sarà $P - e$. Perchè avvenga l'efflusso deve la prima pressione essere maggiore della seconda, cioè: $P - i > P - e$; ossia $i < e$, e quindi la bocca esterna del sifone deve essere più bassa del livello del liquido.

Nel caso dell'acqua essendo $P = 10$ metri circa il sifone non potrebbe agire se la parte più elevata del medesimo fosse ad altezza maggiore di 10 metri sul livello del liquido nel recipiente.

A misura che il liquido effluisce la vena sgorgante si fa più sottile, perchè decresce la differenza di altezza fra il livello del medesimo nel vaso e la bocca esterna del sifone.

2. Sifone ad efflusso costante. — Si può mantenere costante quella differenza mediante il *sifone ad efflusso costante*, il quale è un sifone (figura 145) il cui ramo corto traversa un grosso tappo di sughero galleggiante sul liquido, e opportunamente sostenuto in alto mercè una funicella che passa sulla gola di una carrucola fissa, e un contrappeso. Così, mediante il galleggiante, il sifone affonda nel liquido a misura che questo scende nel recipiente, e rimane costante la distanza fra il suo livello e la bocca esterna del tubo.

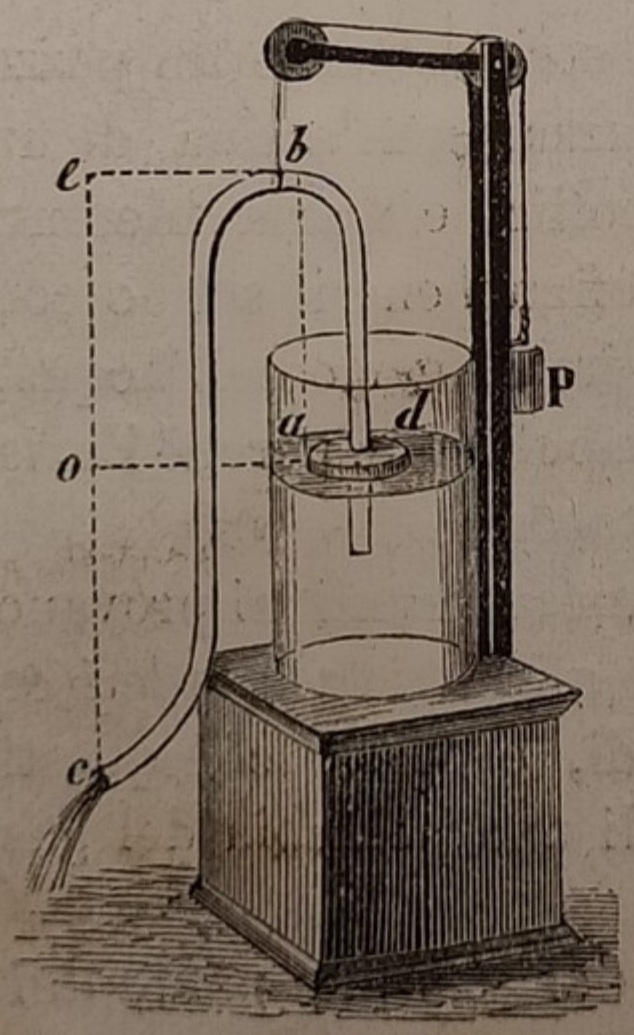


Fig. 145.

3. Il Sifone intermittente, o vaso di Tantalo, è un sifone che dà efflusso intermittente. Consiste in un tubo ricurvo (fig. 146), il cui ramo più corto (A) ha una bocca obliqua vicina al fondo di un vaso esterno, mentre il ramo più lungo (B) lo attraversa e si apre al di sotto (in a).

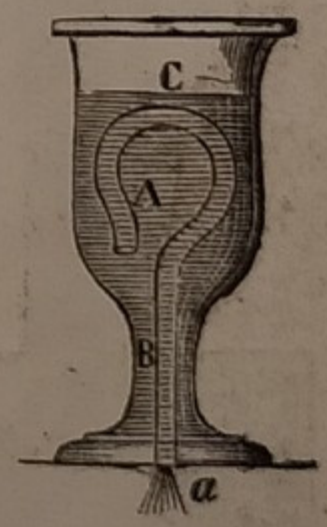


Fig. 146.

Se si fa cadere nel vaso un getto liquido costante il livello si eleva a poco a poco in quello e nel ramo più corto del sifone; quando poi il liquido copre la sommità di questo allora esso discende nel ramo più lungo ed incomincia l'efflusso. E se la quantità di liquido effluente dal sifone è maggiore di quella che arriva nel vaso in egual tempo dal disopra il suo livello va abbassandosi finchè la bocca del sifone vicina al fondo ne rimane

fuori, e allora cessa l'efflusso; poscia il liquido che continuamente arriva nel vaso si va di nuovo innalzando finchè il sifone è nuovamente carico ed allora ricomincia l'efflusso.

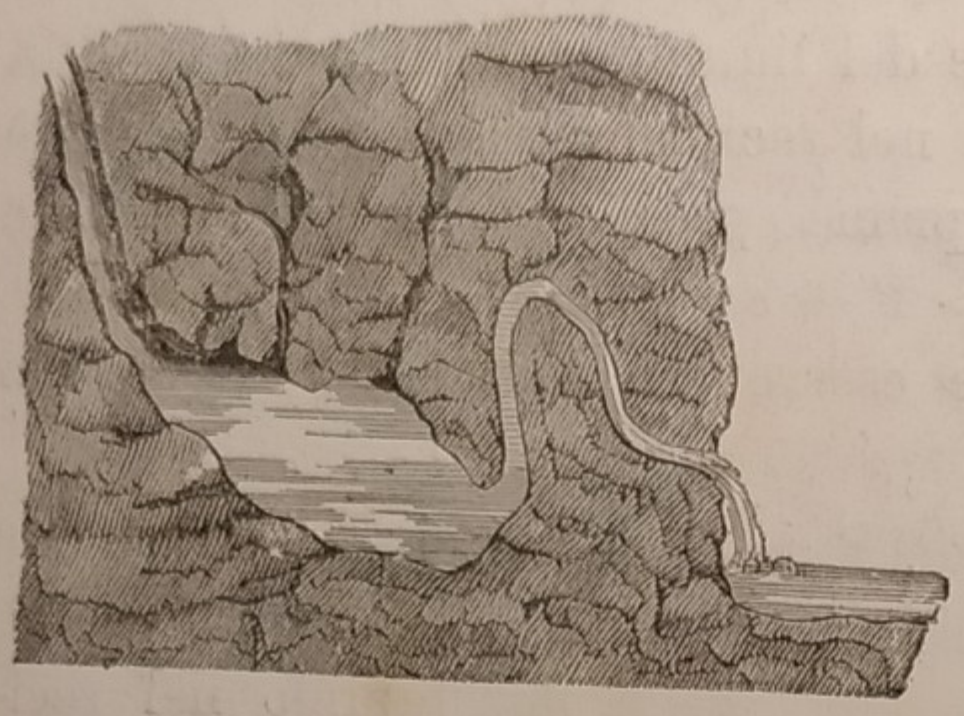


Fig. 147.

4. Fontane intermittenti. — Il sifone intermittente spiega le sorgenti intermittenti naturali (figura 147), nelle quali una cavità naturale, che si riempie a poco a poco coll'acqua di filtrazione, trovasi in comunicazione colla corteccia terrestre mediante un canale ricurvato in alto, come nel sifone descritto; se la cavità si riempie fino all'altezza della curvatura superiore l'acqua effluisce finchè quella sia quasi vuota; allora l'efflusso cessa finchè essa sia di nuovo ripiena fino alla sommità del canale a sifone.

§ 75. Adesione dei gas ai solidi e ai liquidi.

1. Adesione dei gas ai solidi. — Se si immerge un pezzo di ferro o altro metallo, o qualche pietruzza, nell'acqua di un bicchiere, si veggono bollicine d'aria aderenti ai medesimi. Se si strofina bene il solido con stoffa o cuoio prima di immergerlo nell'acqua, non compaiono le dette bollicine, perchè l'aria aderente ne venne distaccata.

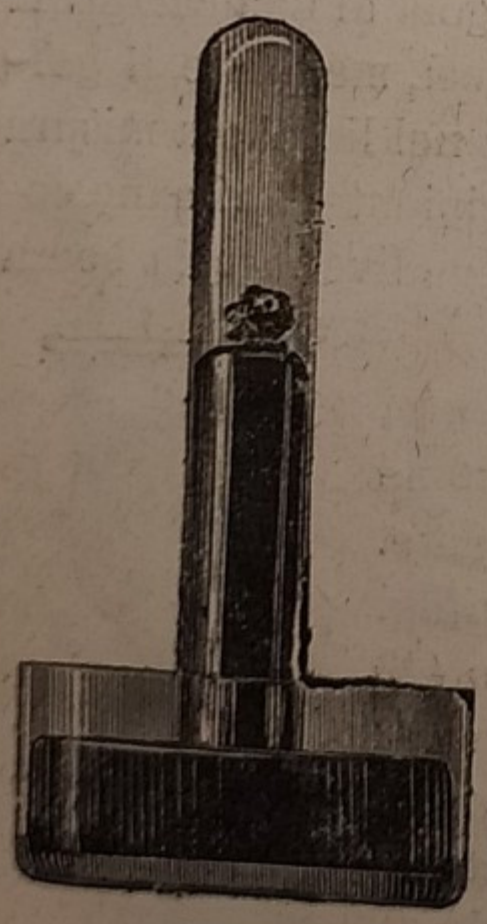


Fig. 148.

Queste semplicissime osservazioni provano che l'aria, come pure gli altri gas, aderisce alla superficie dei solidi, e perciò che questi sono sempre rivestiti di una pellicola del gas in cui sono immersi.

2. Assorbimento dei gas per parte dei solidi porosi. — Se si arroventa un pezzo di carbone di legno per scacciare l'aria dai suoi pori, e poi lo si immerge nel mercurio di una vaschetta, e lo s'introduce in una campanella capovolta nello stesso liquido e contenente anidride carbonica (fig. 148), si vede il mercurio salire lentamente nella campanella, perchè il gas viene assorbito dal carbone. Lo stesso avviene anche solo coll'aria.

L'assorbimento dei gas è sempre accompagnato da innalzamento della temperatura. Il che è provato specialmente da una corrente di idrogeno, che arrivando su un pezzo di *spugna di platino* finamente diviso e spugnoso che si ottiene arroventando un composto di platino denominato *cloroplatinato ammonico* [$PtCl_4(H_4NCl)_2$] e condensandosi nei pori di questo lo arroventa, e il platino arroventato alla sua volta accende il gas idrogeno, sul quale fatto è fondato *l'accendilume a spugna di platino* di Dobereiner (fig. 149).

3. Soluzione dei gas nei liquidi. — I gas aderiscono pure ai liquidi e si sciolgono nei medesimi. Infatti le acque gasose sono acque che contengono in soluzione una notevole quantità di anidride carbonica, che loro si fa assorbire comprimendo in presenza di esse questo gas fino a 6 e più atmosfere, poichè a *temperatura costante la quantità di gas che un liquido può assorbire è proporzionale alla pressione*. Perciò stappando le bottiglie che contengono il detto gas in soluzione, come sono le acque gasose, i vini spumanti, la birra, ecc., una gran parte del gas si svolge in bollicine, perchè diminuendo la pressione sul liquido diminuisce la quantità di gas che esso può tenere in soluzione.

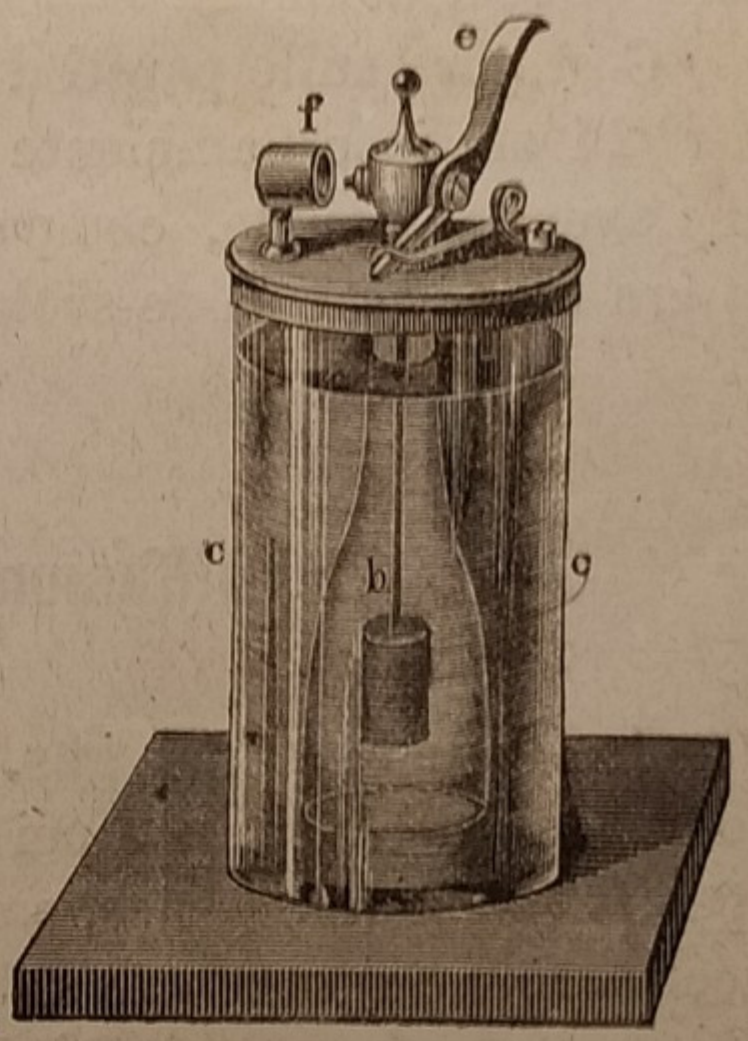


Fig. 149.

Nelle bottiglie dell'acqua di Seltz, dette *Sifoni*, aprendo la chiavetta che chiude il tubo centrale immerso nel liquido, questo effluisce per la pressione che il gas esercita sul liquido circostante al tubo, come nella fontana di compressione.

L'*ammoniaca liquida* che vendono i droghieri e farmacisti è appunto una soluzione di gas ammoniaco (N_3N) nell'acqua, in cui è solubilissimo, poichè a 0° un volume d'acqua assorbe e scioglie 1049 volumi di ammoniaca.

Così pure l'acido cloridrico, o muriatico, che si usa nella chimica e nelle arti, è una soluzione del gas acido cloridrico (HCl) nell'acqua.

Parimenti l'acqua ordinaria contiene sempre dell'aria disciolta nella medesima sotto la pressione atmosferica. Perciò se si colloca un bicchiere d'acqua sul piatto della macchina pneumatica, sotto una campana, e poi si diminuisce la pressione sulla superficie del liquido, si veggono sollevarsi numerose bollicine di aria che vi era entro disciolta. Gli animali acquatici respirano appunto l'aria disciolta nell'acqua.

La quantità del gas assorbito dipende poi anche dalla temperatura, ed in generale *diminuisce col crescere della temperatura*. Perciò riscaldando l'acqua si sviluppano dalla medesima bollicine d'aria che vi era disciolta, e l'acqua bollente è più povera di aria di quella alla temperatura ordinaria.

Così pure sulle pareti d'un bicchiere d'acqua fresca, lasciato per 24 ore in un ambiente a temperatura più elevata di quella che aveva il liquido, compaiono numerose bollicine di aria che vi era disciolta e se ne svolge per l'aumento della temperatura.

§ 76. Diffusione e diosmosi dei gas.

1. Diffusione dei gas. — Se si pone alquanto bicarbonato sodico in un bicchiere e poi si versa sopra un acido qualunque (per es., acido cloridrico, o solforico, diluito con acqua, od acido acetico, ecc.) nasce tosto un'effervescenza dovuta allo svolgimento di gas carbonico (CO_2) dal bicarbonato. Allora se si introduce nel bicchiere un cerino acceso, questo si spegne per la presenza del gas carbonico, inetto alla combustione. Ma se si lascia il bicchiere aperto e dopo poco tempo si ripete l'esperimento dell'immersione del cerino acceso, si vede che esso più non si spegne. Ciò dimostra che il gas carbonico, quantunque più pesante dell'aria, è uscito dal bicchiere, mentre l'aria esterna è venuta a ripigliare il posto del gas nel recipiente.

In generale: *due o più gas, che non agiscono fra loro chimicamente, quando si trovano in contatto, in breve tempo penetrano reciprocamente l'uno nell'altro, cosicchè risulta una mescolanza uniforme nei medesimi.*

Il fenomeno chiamasi *diffusione dei gas.*

Esso è anche più precisamente dimostrato dall'*esperienza di Berthollet.*

Si prendono due palloni di vetro (fig. 150), pieni, l'uno di idrogeno e l'altro di gas carbonico (CO_2), muniti di tubulature con chiavette, cosicchè si possono mettere in comunicazione. Si pone il pallone contenente l'idrogeno più leggiero al di sopra, e l'altro contenente il gas carbonico, 22 volte più pesante di quello, al di sotto. Indi si aprono le chiavette, e dopo un certo tempo si trovano i due gas mescolati nei due recipienti.

Fig. 150.

La presenza del gas carbonico nei due palloni si può dimostrare mediante l'acqua di calce, la quale versata nei medesimi, e poi agitatavi, si intorbida.

La presenza del gas idrogeno in ambidue si può dimostrare accostando alle loro bocche una fiamma, la quale lo accende.

2. La causa della diffusione dei gas è quella stessa che genera la loro proprietà espansiva, cioè il moto progressivo delle loro molecole, con velocità diversa pei diversi gas.

E la lentezza della loro diffusione deriva dagli urti reciproci delle molecole.

Infine la diffusione dei gas è la prova più semplice e convincente che essi sono formati da particelle perfettamente libere, separate le une dalle altre, e che volano continuamente in tutte le direzioni.

3. Effetti della diffusione dei gas. — In grazia della diffusione dei gas la nostra atmosfera ha dappertutto la stessa composizione, in basso come in alto, nei luoghi abitati come in quelli deserti (fra certi limiti); per lo stesso fatto il gas carbonico penetra nelle foglie delle piante, che lo scompongono, ritenendo il carbonio e restituendo l'ossigeno all'aria.

Ma per la lentezza della diffusione l'anidride carbonica più pesante dell'aria si mescola alquanto lentamente con questa; perciò nella Grotta del Cane, vicino a Napoli, ove essa si solleva dal suolo, forma un'atmosfera irrespirabile solo in basso fino ad un'altezza di circa 60 *cm.*, per cui un cane introdottovi vi perisce, mentre in alto essa è abbastanza mescolata coll'aria, e così la miscela non è più rapidamente asfissiante.

Il miscuglio dei gas coll'aria è poi accelerato dalla agitazione di questa, cioè dai venti.

4. Diosmosi dei gas. — Come i liquidi, così pure i gas, quando sono separati da una parete permeabile, attraversano questa con diversa celerità, e si diffondono gli uni negli altri, il che costituisce il fenomeno della *diosmosi dei gas*. Per es. i palloncini di caucciù pieni di gas idrogeno che servono di trastullo ai ragazzi perdono presto la loro forza ascendente, perchè il gas idrogeno interno ne esce attraverso la parete permeabile in cui è racchiuso, mentre l'aria esterna penetra nell'interno dei medesimi, e perciò si forma presto un miscuglio di idrogeno e aria, che non è più abbastanza leggiero per potersi sollevare insieme colla membrana che lo racchiude.

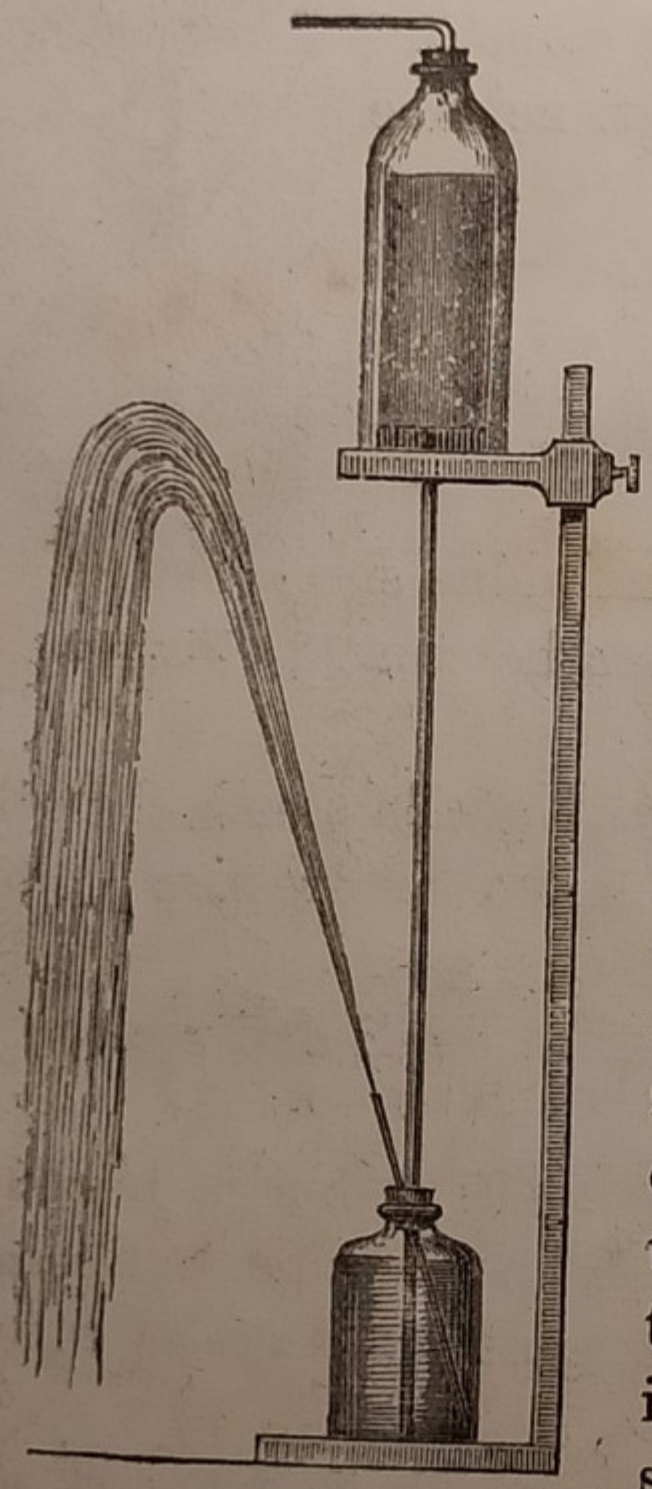


Fig. 151.

Si può dimostrare sperimentalmente che i gas più leggieri attraversano una parete porosa in maggior copia di quelli più pesanti mediante l'apparecchio della figura 151.

Esso consta di un vaso poroso applicato alla sommità di un lungo tubo di vetro, il quale pesca inferiormente nel liquido colorato (ad es., una soluzione di solfato di rame nell' acqua) contenuto in un recipiente, passando pel tappo otturatore. Questo è ancora attraversato da un tubo laterale che pesca inferiormente nel liquido e si solleva superiormente in punta a breve altezza sopra di quello.

Ora, ogniqualvolta si sovrappone al vaso poroso una campana piena di gas idrogeno, esce dal tubo corto appuntato uno zampillo, perchè quel gas si diffonde nel vaso poroso più abbondantemente che l'aria di questo nella campana, gorgoglia a traverso il liquido, e viene ad aumentare la pressione sul medesimo. Allontanando poscia la campana di vetro il liquido sale nel tubo per la diminuzione della pressione nell'interno, dovuta all'essere la velocità con cui l'idrogeno esce dal vaso poroso maggiore di quella colla quale l'aria entra dal di fuori.

Un'esperienza analoga è la seguente. Si chiude un vaso poroso (fig. 152) con un tappo forato attraversato da un manometro, cioè da un tubo doppiamente ricurvo e aperto in alto, nel quale si pone un liquido che si eleva dapprima allo stesso livello nei suoi due ultimi rami. Indi si introduce il vaso poroso in un recipiente più grande contenente vapore d'etere, che si ottiene facilmente scuotendo quello dopo avervi versato alquanto etere liquido. Allora si osserva che il liquido del manometro si abbassa nel ramo aperto, ciò che dimostra una diminuzione di pressione nell' interno del vaso poroso, perchè l'aria atmosferica che vi è contenuta essendo circa 5 volte meno densa del vapore d'etere esce dal vaso con maggiore velocità che non vi penetri detto vapore.

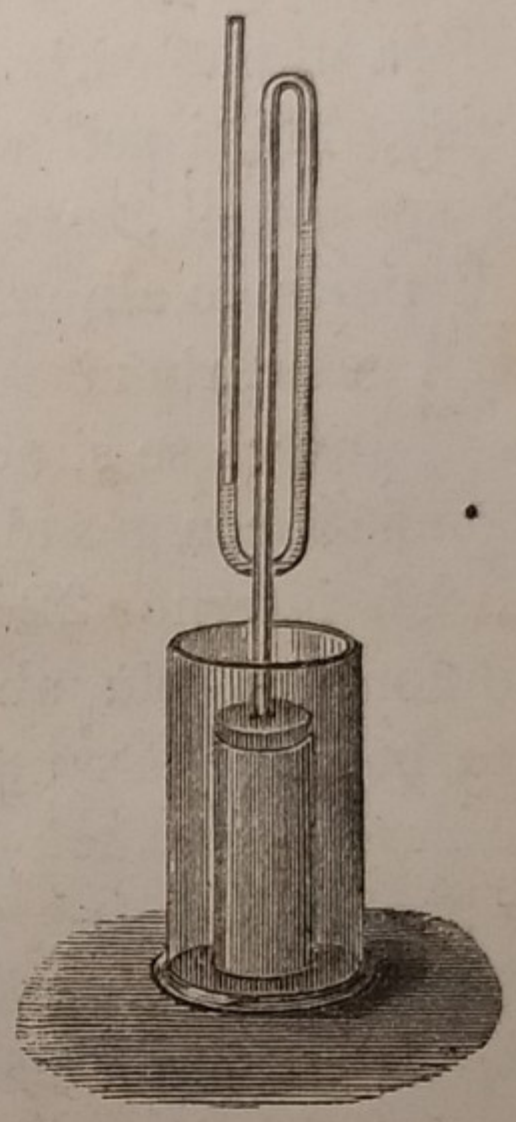


Fig. 152.

Quando il livello del liquido nei due rami è ritornato eguale, perchè si è ristabilito l'equilibrio fra la pressione interna e l'esterna, se si mette il vaso poroso nell'aria, avviene un cambiamento di livello inverso, perchè essa penetra più prontamente nel vaso contenente ancora vapore d'etere che questo non ne esca.

Un'interessante applicazione della diosmosi dei gas è l'*indicatore di Ansell* il quale serve ad avvisare la presenza del gas illuminante, o del gas delle miniere (idrogeno protocarbonato, H_4 C) nell'aria. Consiste in un imbuto chiuso da una lastra (D, fig. 153) di terra porosa, applicato all'estremità di un tubo piegato ad U e contenente mercurio. Il liquido rimane allo stesso livello nei due rami, finchè vi è aria tanto all' esterno quanto all'interno. Ma se esternamente si trova gas diverso dall' aria, per es., idrogeno carbonato, esso penetra in maggior copia che quella non esca, e determina un dislivello del mercurio, che salendo nel ramo aperto va a toccare un filo di platino, cosicchè una

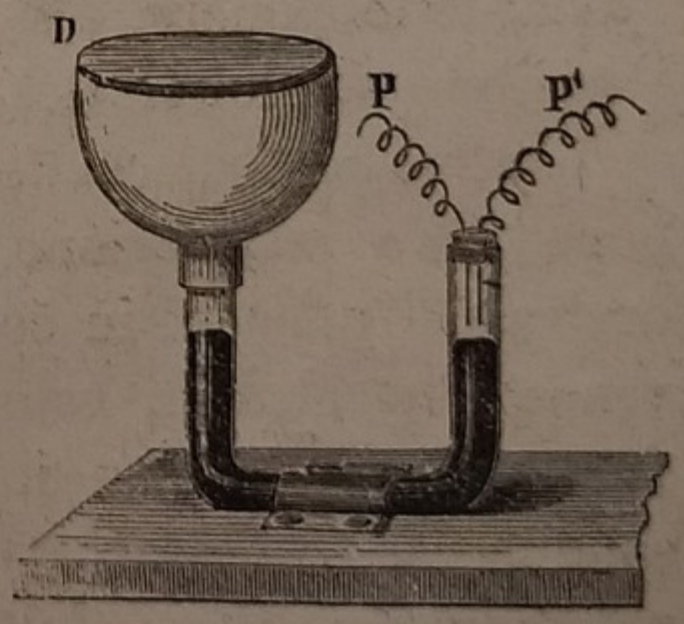


Fig. 153.

corrente elettrica può percorrere il circuito di una soneria, e metterla in azione.

Se si lascia cadere una bolla di sapone gonfia d'aria in un gran recipiente di vetro, nel fondo del quale si è sviluppato un'atmosfera di gas carbonico (versando per es. acido cloridrico o tartarico, diluiti nell'acqua, sul bicarbonato sodico), la bolla rimane sospesa nell'atmosfera di gas carbonico per la sua minore densità, diminuendo alquanto di volume, perchè l'aria interna si diffonde nel gas carbonico esterno più rapidamente di questo in quella.

Invece se si pone nell'anidride carbonica una bolla di sapone gonfiata con gas idrogeno, la si vede aumentare di volume, mentre il gas interno, 22 volte più leggiero di quello esterno, dovrebbe diffondersi più abbondantemente. Il che avviene perchè il gas carbonico è assai più solubile nella lamina liquida che l'idrogeno, e perciò passa più facilmente di questo attraverso la detta lamina, sciogliendosi dapprima in esso e poi diffondendosi nell'idrogeno interno, d'onde l'aumento di volume.

Così pure molti metalli arroventati assorbono alcuni gas e poi li lasciano passare come i settî colloidi. Per es., l'argento assorbe l'ossigeno; il palladio, il platino e il ferro assorbono l'idrogeno e lo lasciano passare attraverso la loro massa. Il ferro arroventato lascia passare anche l'ossido di carbonio (CO); e questa è la causa degli effetti dannosi e talvolta mortali prodotti dalle stufe e caloriferi, quando le loro pareti coll'arroventamento lasciano passare l'ossido di carbonio che si diffonde nell'aria delle camere, essendo il detto gas velenoso perchè piglia l'ossigeno ai globuli del sangue.

Infine la diosmosi dei gas ci dà ragione dei fenomeni che avvengono nella respirazione animale. L'ossigeno dell'aria inspirata arriva nei polmoni in contatto coi vasi che contengono il sangue venoso, penetra in esso attraversando le pareti di quei vasi, mentre inversamente il gas carbonico ed il vapor acqueo del sangue passano esternamente attraverso le dette pareti, e vengono poi espulsi nell'atto della espirazione.

Capitolo V.

NOZIONI DI ACUSTICA

§ 77. Moto vibratorio dei corpi elastici.

1. Esperienze. — Se un ferro da calze viene fissato su una tavola, colla mano o con una morsa, in qualche punto della sua lunghezza, e poi, dopo averne inflessa alquanto la parte libera (non in contatto colla tavola), la si abbandona a sè, si vede che *prende l'aspetto di un ventaglio*, perchè acquista un rapido moto di va e vieni da una parte e dall'altra della posizione rettilinea primiera. Ma quando un corpo si muove rapidamente, noi lo vediamo contemporaneamente in tutte le posizioni che esso assume, per un fènomeno ottico denominato *persistenza delle immagini sulla retìna* (reticella formata dai nervi ottici), il quale consiste in ciò che, l'impressione prodotta da un oggetto in un certo punto della retìna non sparisce immediatamente collo sparire di esso, ma dura per circa $^1/_{10}$ di secondo. Ora, siccome il ferro prende quelle diverse posizioni in meno di $^1/_{10}$ di secondo, così noi lo vediamo in una posizione estrema, mentre in un altro luogo della retìna esiste ancora l'impressione prodotta dal ferro nell'altra posizione estrema, e così per quelle intermedie, per modochè noi lo vediamo contemporaneamente in tutte le posizioni che esso prende nel suo rapido moto di va e vieni, fènomeno analogo a quello che succede quando si fa girare rapida-

mente un carbone acceso, che appare siccome un nastro luminoso continuo.

Analogamente si comporta una corda tesa, come quelle degli strumenti a corde (violino, viola, violoncello, contrabasso, mandolino, chitarra, pianoforte, ecc.), la quale, sovratutto se è alquanto lunga, appare ingrossata nel mezzo, per il detto fenomeno della persistenza delle immagini sulla retìna.

2. Moto vibratorio. — Il detto movimento è manifestamente analogo a quello già studiato nel pendolo (§ 30) colla differenza che in questo è prodotto dalla gravità, che lo fa ritornare nella posizione verticale primiera dopo che ne venne spostato, mentre il ritorno del ferro nella posizione primiera è dovuto alla elasticità (pag. 148).

Infine, come il pendolo giunto nella posizione verticale di riposo non si arresta, ma per inerzia si sposta dalla parte opposta, e sale ad un'altezza che sarebbe eguale a quella da cui discende, e perciò durerebbe eternamente, se non incontrasse resistenze, così pure le particelle del ferro da calze giunte nella posizione primiera non si arrestano, ma per inerzia si spostano dalla parte opposta, e poi ritornano indietro, e così acquistano quel moto di va e vieni, che sarebbe perpetuo se non si comunicasse ad altri corpi.

Nel caso del pendolo tale moto si dice *oscillatorio*, ed ogni andata col rispettivo ritorno da una posizione estrema all'altra appellasi *oscillazione;* nel caso dei corpi elastici, il detto movimento chiamasi piuttosto *vibratorio*, ed ogni spostamento da una posizione estrema all'altra col rispettivo ritorno, chiamasi *vibrazione*.

Il carattere del moto oscillatorio o vibratorio consiste manifestamente in ciò che: *in eguali intervalli o periodi di tempo le particelle oscillanti o vibranti ripassano per le medesime posizioni, colla stessa velocità.*

Il più semplice moto oscillatorio è quello di un punto che descrive una circonferenza con moto uniforme, perchè non solo ripassa in eguali periodi di tempo nelle stesse posizioni e colla stessa velocità, ma questa rimane costante per tutta la durata del suo moto, mentre nel moto pendolare la velocità varia.

La velocità e la direzione del movimento in un dato punto della traiettoria costituiscono la *fase* della vibrazione.

3. Isocronismo delle vibrazioni. — Anche per le vibrazioni prodotte dalla elasticità vale la legge dell'*isocronismo* (pag. 149), e vale qualunque sia la loro ampiezza, purchè questa non oltrepassi il limite di elasticità, cioè il limite di spostamento delle particelle, oltre il quale esse non ritornano più nella posizione primitiva.

4. Relazione fra la durata delle vibrazioni e il loro numero. — La *durata delle vibrazioni è inversamente proporzionale al loro numero*, perchè esse essendo isocrone, se in 1 secondo vengono eseguite n vibrazioni, il tempo t, o la durata di una di esse, è evidentemente $t = {}^1/_n$.

§ 78. Causa del suono.

1. Esperienze. — Quando un ferro da calze, od una corda tesa, vibrano abbastanza celeremente, si ode un suono.

Parimenti fa sentire un suono una campana di vetro o metallo quando viene scossa, perchè anch'essa acquista un moto vibratorio, per cui le sue pareti si muovono alternativamente verso l'interno e verso l'esterno. In questo caso per rendere sen-

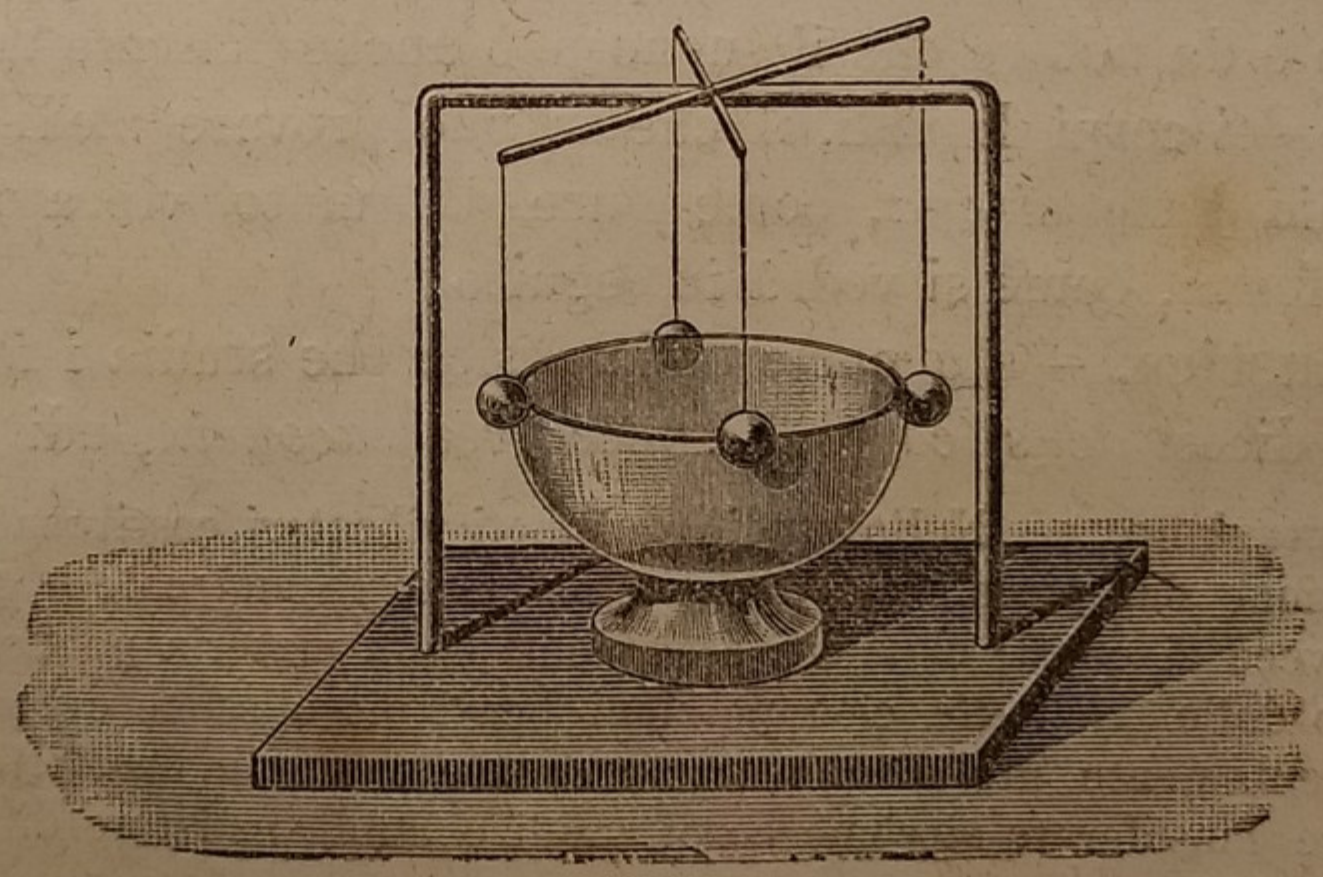


Fig. 154.

sibile tale moto vibratorio conviene accostare alle pareti una punta metallica, od una pallina d'avorio, o di marmo, sospesa ad un filo (fig. 154); allora si sentono replicati urti della campana contro la punta, o la pallina, la quale si vede anche salterellare.

Toccando il corpo sonoro colla mano cessa il suono perchè si spegne il moto vibratorio.

Così pure, se si scuote un corista, che è una verga d'acciaio piegata ad U (fig. 155), la quale serve a dare una nota fondamentale per accordare gli strumenti musicali, e poi lo si accosta allo spigolo di una tavola, mentre si ode il suono si sentono replicati urti del corista contro lo spigolo, e toccandolo colla mano, il suono cessa.

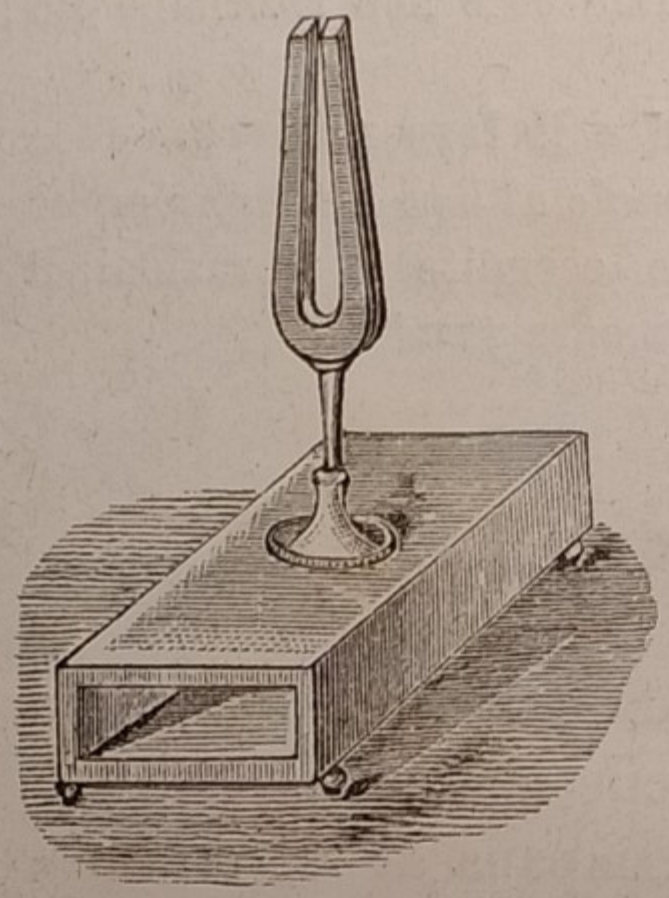


Fig. 155.

Per tale esperienza conviene svitare il corista dalla sua cassa armonica.

2. Causa del suono. — Dalle precedenti esperienze risulta che *il suono nasce dal moto vibratorio dei corpi elastici*. Notisi però che per costituire un suono il moto vibratorio non deve essere nè troppo celere nè troppo lento. Per esempio, quando un pendolo oscilla non si ode suono, perchè il moto è troppo lento.

Infine è da notare che il suono può anche nascere dal moto vibratorio dei corpi liquidi, il che si può provare mediante un apparecchio detto *sirena*, come pure dal moto vibratorio dei corpi aeriformi, come si vedrà in seguito.

3. Acustica. — La parte della Fisica che studia i fenomeni del suono dicesi *acustica* (dalla voce greca *acouein*, udire).

4. Osservazione. — Nello studio dei moti vibratori costituenti i suoni si fa astrazione dai piccoli movimenti che hanno le molecole e gli atomi, ed anzi, invece di questi elementi costituenti della materia ponderabile, si considerano delle *particelle*, cioè porzioni bensì piccolissime dei corpi, ma pure sufficientemente grandi per comprendere molte molecole, e tali da poter essere considerate siccome corpi solidi o fluidi, in istato di quiete o di moto relativo.

§ 79. Propagazione del suono.

1. Propagazione per i gas. — Perchè il moto vibratorio dei corpi elastici produca impressione nell'orecchio si richiede evidentemente che fra quelli e questo esista una sostanza capace di partecipare a quel moto e trasmetterlo al medesimo. Tale sostanza, che trasmette il suono, ordinariamente è l'aria.

Si prova che senza l'aria il suono non arriva all'orecchio, mediante un pallone di vetro in cui è sospeso un campanello mediante una sostanza non elastica, come un nastrino di cuoio (fig. 156). Quando nel pallone vi è l'aria, scuotendo il campanello si sente il suono; ma se dal medesimo si toglie l'aria mediante la *pompa pneumatica* non si ode più nulla.

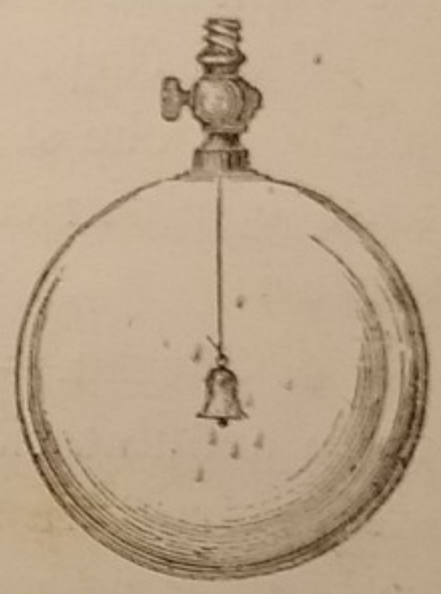


Fig. 156.

Se invece dell'aria si introduce nel pallone un altro gas si ode nuovamente il suono. Dunque non solo l'aria ma tutti i gas possono trasmettere il suono.

La stessa esperienza può farsi con una soneria collocata sotto una campana da cui si estrae l'aria.

2. Propagazione pei liquidi. — Anche i liquidi possono trasmettere il suono. Infatti, scuotendo un campanello nell'acqua si ode il suono. I pesci fuggono pei rumori che si fanno sulla riva, e nella piscicoltura accorrono al pascolo quando si fa suonare una campana nell'acqua. Così pure i palombari, cioè gli operai che discendono nell'acqua, sentono i rumori che si fanno al di fuori.

3. Propagazione pei solidi. — Infine il suono si trasmette benissimo mediante i corpi solidi elastici. Infatti, mettendo l'orecchio all'estremità di una lunga trave, si ode il *tic-tac* di un oriuolo posato sull'altra estremità, come pure il più leggiero fruscìo prodotto sul legno da una barba di penna, che non si ode per mezzo dell'aria.

Il tuonar del cannone si ode ponendo l'orecchio a terra meglio che mediante l'aria, e così pure il calpestìo dei cavalli. Nelle case si odono i suoni attraverso ai muri, sovratutto quelli del pianoforte, che appoggiando sul pavimento comunica a questo e ai muri il proprio moto vibratorio. Nelle gallerie delle miniere i minatori odono attraverso alle roccie i colpi di scalpello che i loro compagni dànno nelle gallerie vicine.

Invece conducono male il suono i corpi composti di frammenti, come la lana, il cotone, le penne, la segatura di legno, la sabbia, ecc., perchè privi di elasticità.

Un'applicazione della proprietà dei solidi elastici di trasmettere bene il suono è lo *stetoscopio*, strumento che serve ai medici per esplorare le funzioni della respirazione e della circolazione.

Fra i corpi elastici, l'aria è uno dei peggiori conduttori del suono. Il che si deve considerare come un vantaggio, perchè se fosse conduttrice come molti solidi noi saremmo sovente assordati.

4. Mezzo. — Il corpo in cui avviene la propagazione di un moto ondulatorio si dice *mezzo*, e se questo ha dappertutto la stessa struttura si dice *omogeneo* od *isotropo*, se no viene detto *eterogeneo* od *anisotropo*.

§ 80. Velocità del suono.

1. Il suono si propaga più lentamente che la luce. — Il rumore prodotto dallo sparo di una lontana arma da fuoco arriva all'orecchio qualche tempo dopo l'apparizione della luce all'occhio, evidentemente perchè *il suono si propaga più lentamente che la luce*. Così pure da lungi si vede la scure dello spaccalegna percuotere il ceppo, il martello dello spaccapietre dare il colpo sul sasso, la lavandaia battere le stoffe sull'assicella e solo dopo un certo tempo si ode il rumore del colpo. Parimente il fragore del tuono giunge all'orecchio dopo la luce del lampo, quantunque i due fenomeni succedano contemporaneamente.

2. Velocità del suono nell'aria. — Siccome i suoni si propagano ordinariamente mediante l'aria, importa dapprima conoscere la velocità della loro propagazione nella medesima. Questa velocità venne determinata direttamente in diversi tempi e luoghi, osservando il tempo impiegato dal rumore prodotto dallo sparo di un'arma da fuoco a percorrere una conosciuta distanza.

Così, nel 1822, Arago ed Humboldt con altri osservatori in una notte estiva fecero sparare replicati colpi di cannone alternativamente su due alture (Montléry e Villejuif presso Parigi), visibili dall'una all'altra, e misurarono con esatti cronometri il tempo che trascorreva tra l'apparizione della luce e l'arrivo del rumore. La media dei tempi trascorsi fu di 53,6 secondi. Divi-

dendo per questo numero la distanza delle due stazioni, che era 18612,452 *m.*, trovarono che alla temperatura di 15° la velocità del suono è 340,89 *m.*

Lo sparo alternato aveva per iscopo di eliminare l'influenza del vento, il quale aumenta o diminuisce la velocita della propagazione secondochè spira nello stesso senso o in senso contrario a quella.

Si è poi ancora accertato che il suono si propaga con moto uniforme, perchè mediante osservatori intermedi si trovò che *il tempo impiegato dal suono cresceva in proporzione della distanza.*

In queste esperienze non si tenne conto del tempo che impiegava la luce a percorrere quella distanza, perchè era affatto trascurabile, essendo la velocità della luce, come insegna l'*Ottica*, di 300 milioni di metri per secondo.

Altre esperienze dimostrarono che *la velocità del suono nell'aria diminuisce col diminuire della temperatura*, siccome si scorge nella seguente tabella:

Temperatura	+ 15°	C. . . .	Velocità	340 *m.*	circa
»	10°	» . . .	»	337	»
»	0°	» . . .	»	331	»
»	— 38,5	» . . .	»	309	»

La diminuzione è circa 0,626 *m.* per ciascun grado.

Dalla velocità del suono nell'aria si deducono per approssimazione le distanze. Così, se trascorrono 5 secondi tra l'istante in cui si vede la luce dello sparo di un'arma da fuoco, ovvero il lampo del fulmine, e quello in cui si sente il rumore, od il tuono, si deduce che la distanza dell'osservatore dal luogo in cui si produsse lo scuotimento è: $340 \times 5 = 1700$ *m.*, supposta la temperatura di 15° circa.

Nell'aria libera la velocità della propagazione è presso a poco la stessa pei suoni intensi e deboli, acuti e gravi. Se così non fosse, non si sentirebbe la musica a distanza, perchè le note non giungerebbero all'orecchio collo stesso ordine con cui vengono eseguite.

3. Velocità del suono in diversi gas. — La *velocità del*

suono nei gas diversi dall'aria venne determinata con altri metodi, e si trovò che è diversa secondo i gas; ad esempio:

Kundt trovò nei tubi per l'aria a 0°	332,8 *m.*	
Idrogeno	»	1284 »
Anidride carbonica	»	266 »
Gaz luce	»	533 »

4. La velocità del suono nell'acqua è stata determinata direttamente da Colladon e Sturm (nel 1825) con esperimenti fatti sul lago di Ginevra, analoghi a quelli coi quali è stata determinata la velocità del suono nell'aria.

Due barche erano state ancorate alla distanza di 13500 metri fra loro. Dall'una di esse pendeva una campana immersa nell'acqua, e un mucchietto di polvere collocato sulla barca veniva infiammato nello stesso istante in cui un martello batteva sulla campana. Sull'altra barca l'osservatore ascoltava il suono prodotto da quella, applicando l'orecchio all'estremità superiore di un tubo dilatato nella parte inferiore immersa nell'acqua, e colla bocca rivolta alla parte d'onde veniva il suono.

Così essi trovarono che la velocità del suono nell'acqua è di 1435 *m.* a $+8°$, cioè circa 4 volte e $^1/_2$ maggiore che nell'aria.

5. Velocità del suono in alcuni corpi solidi. — Infine venne anche determinata con diversi metodi la velocità del suono in molti corpi solidi, e si trovò che: *nei metalli* è da 4 a 17 volte maggiore che nell'aria; *nei legni* è maggiore nella direzione delle fibre che in direzione trasversale; nella prima direzione è da 10 a 15 volte maggiore che nell'aria. — · — · —

§ 81. Onde e raggi sonori.

1. Il moto ondulatorio nei liquidi. — Ognuno sa che quando una pietra cade nell'acqua nascono attorno al centro di scuotimento onde circolari, le quali si propagano sulla superficie del liquido con moto uniforme. Ciascuna onda è costituita da un sollevamento e una depressione, che si propagano sulla superficie del liquido, dal centro di scuotimento verso l'esterno.

In tale movimento le particelle liquide si sollevano e si abbassano alternativamente senza trasportarsi orizzontalmente, come si può verificare mediante piccoli galleggianti; però le particelle nelle loro oscillazioni non descrivono linee rette, ma curve, le quali sono circonferenze quando le onde sono regolari, siccome venne dimostrato dai fratelli Weber.

2. Causa del fenomeno. — Il modo ondulatorio di un liquido è evidentemente dovuto alla pressione che il corpo cadente esercita sul medesimo, la quale pressione, pel principio di Pascal (pag. 158), si trasmette tutt'all'intorno, donde nasce il sollevamento circolare.

Indi al posto di questo compare una depressione, perchè le particelle liquide, dapprima sollevate, nel discendere acquistano una velocità per cui oltrepassano la posizione di riposo e si abbassano sotto il livello del liquido; e siccome abbassandosi esercitano una pressione, questa dà luogo ad un nuovo e contiguo sollevamento circolare, e così di seguito. Di più, siccome la massa liquida che si solleva cresce col crescere della distanza dal centro di scuotimento, perciò l'altezza dei sollevamenti va diminuendo, e così pure la profondità delle depressioni.

3. Il moto ondulatorio in una fune. — Per studiare il moto ondulatorio nelle scuole si usa con vantaggio una fune pieghevole, o un tubo di gomma elastica. Si fissa la fune, o il tubo, in alto al soffitto della camera, in modo che sia appeso verticalmente, quindi colla mano si fa eseguire al capo inferiore una oscillazione pendolare da una parte e dall'altra della posizione di riposo, e perpendicolarmente alla lunghezza del tubo; si veggono così nascere nel medesimo due sinuosità, l'una da una parte e l'altra dall'altra della posizione verticale di riposo, le quali si propagano nel tubo fino al capo superiore fisso, ove giunte ritornano indietro, cioè si riflettono.

4. Causa del fenomeno. — Una fune od un tubo di gomma si possono considerare come costituiti dalla riunione di un gran numero di serie lineari parallele di particelle congiunte dalla coesione. In ciascuna di tali serie, il moto della 1ª si comunica successivamente alle altre, impiegando però un tempo per passare dall'una all'altra; perciò la 2ª particella trascinata dalla 1ª si mette ad oscillare nel medesimo modo di questa, però con un poco di ritardo; la 3ª trascinata dalla 2ª incomincia e finisce la sua oscillazione con un ritardo maggiore, e così di seguito, per modo che quando la 1ª particella ha compiuto la metà della sua oscillazione, i suoi diversi spostamenti dalla posizione di riposo si trovano distribuiti nelle particelle di

un segmento, le quali vengono così a disporsi secondo una curva che rivolge la sua convessità dalla parte dello spostamento della 1ª particella. Quando poi questa eseguisce l'altra metà della sua oscillazione, cioè si sposta dall'opposta parte, gli spostamenti delle particelle del 1° segmento si comunicano alle particelle di un altro segmento di eguale lunghezza, mentre nel primo segmento nasce identicamente una sinuosità in senso contrario.

Così mentre il capo della fune eseguisce una oscillazione intiera nascono in essa due sinuosità eguali e contrarie, per i due spostamenti eguali e contrari del detto capo.

5. Fasi ed elongazioni. — Ciascuna particella della serie costituente l'onda è in movimento, ma le singole particelle hanno diversa distanza dalla loro posizione d'equilibrio. *La parte della sua oscillazione che una particella ha eseguito dopo che ha cominciato a muoversi dalla posizione di equilibrio* chiamasi *fase* della vibrazione, od oscillazione, e lo spostamento dalla detta posizione dicesi *elongazione*. Una particella che sta per cominciare l'oscillazione ha elongazione e fase 0; quando ha descritto $^1/_4$ della sua oscillazione ha la fase $^1/_4$, e l'elongazione massima; quando ripassa nella posizione d'equilibrio per allontanarsi dall'opposta parte, è nella fase $^1/_2$ e ha l'elongazione 0; quando ha di nuovo l'elongazione massima dall'opposta parte della posizione d'equilibrio è nella fase $^3/_4$. Dunque la massima elongazione corrisponde alle fasi $^1/_4$ e $^3/_4$.

6. Sistema di onde. — Se la 1ª particella dopo compiuta la sua oscillazione si ferma, l'onda seguita a propagarsi, lasciando in riposo le particelle che hanno già oscillato e giunge fino al capo della fune, ove si riflette, cioè ritorna indietro. Ma se alla 1ª oscillazione della particella ne seguono altre nasce nella fune un sistema di onde.

7. Il moto ondulatorio nell'aria. — Un fenomeno analogo, sebbene non identico, succede nell'aria quando viene scossa da un corpo sonoro vibrante, per es., da una campana. Quando le sue pareti si muovono versô l'esterno comprimono l'aria circostante fino ad una certa distanza, eguale allo spazio che percorrono gli scuotimenti nell'aria nel tempo di una semivibrazione della campana, e nasce così uno strato di aria condensata, che si dice *semionda condensata*. Quando invece le pareti della campana si muovono verso l'interno, la condensazione avvenuta nel primo strato aereo passa avanti in un secondo strato di eguale grossezza, perchè la compressione tende a propagarsi nella direzione della minima resistenza, cioè verso gli strati esterni non ancora compressi, mentre nel primo stato aereo in contatto colla campana l'aria si espande e così nasce nel medesimo una semionda rarefatta.

Se la campana continua a vibrare, determina continuamente nell'aria altre semionde alternativamente condensate e rarefatte, le quali si propagano colla velocità del suono.

Però mentre su un liquido le onde sono circolari, nell'aria, estesa in ogni senso attorno al centro di scuotimento, le onde sono sferiche.

8. Analisi più minuta delle onde sonore. — Per conoscere più precisamente come avviene la propagazione del suono nell'aria consideriamo dapprima il fenomeno in una sola direzione, p. es., in un tubo cilindrico M N (fig. 161). Sia *l* una lamina vibrante di un corista collocato ad un'estremità M del tubo. Quando essa passa da una posizione estrema *l'* all'altra *l''* urta le molecole contigue dell'aria, e le sposta nella direzione del suo moto; queste urtano e spostano le successive, e così di seguito fino ad una certa distanza *l''* A, eguale allo spazio che percorre uno scuotimento nell'aria durante il tempo impiegato dalla lamina a passare da *l'* in *l''*, ossia durante

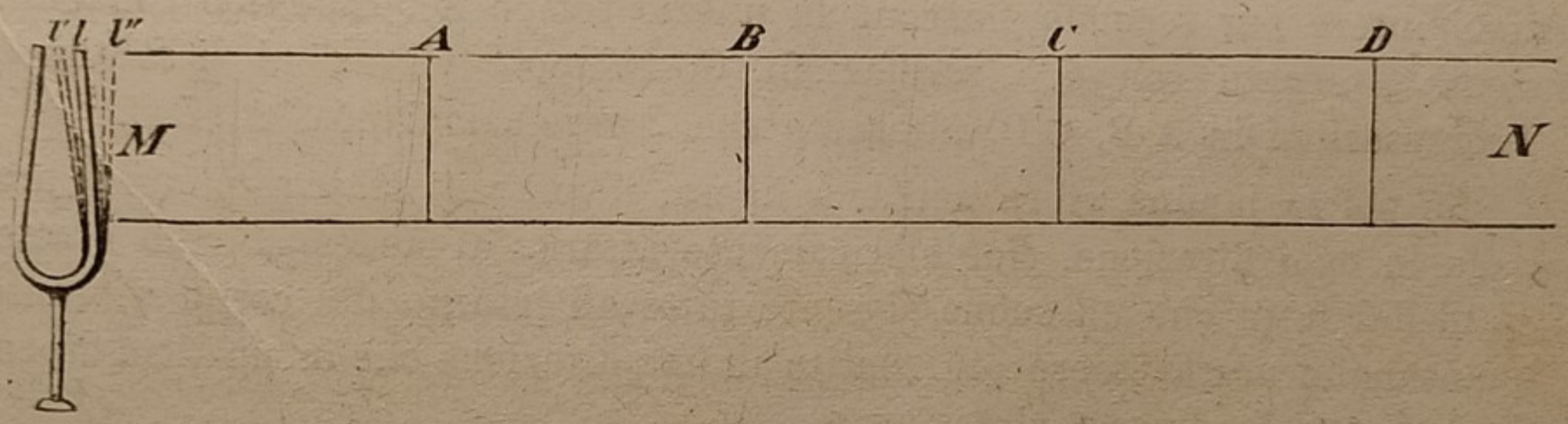


Fig. 157.

una semivibrazione della medesima. Se, p. es., essa fa 870 semivibrazioni per secondo, come il corista normale francese, ogni semivibrazione dura $^1/_{870}$ di secondo, e siccome il suono, come vedemmo, si propaga con moto uniforme e colla velocità di 340 *m.* alla temperatura di 15°, in $^1/_{870}$ di secondo esso si propaga nell'aria per $340 : 870 = 0{,}390$ *m.* circa; cioè nel tempo di una semivibrazione il movimento della laminetta impresso all'aria arriva alla distanza di 390 *mm.* Per la compressibilità dei gas, in questo strato aereo le molecole vengono avvicinate le une alle altre, e nasce perciò una *condensazione.* E siccome la lamina passa da *l'* in *l''* con velocità dapprima crescente e poi decrescente, perciò la condensazione sarà massima nel mezzo dello strato, ove sarà giunta la velocità massima di quella nel mezzo della vibrazione, e minima alle estremità, ove le particelle hanno la velocità minima iniziale e finale della lamina.

Quando questa ritorna da *l''* in *l'*, la condensazione avvenuta nel primo strato aereo l'' A, della lunghezza di 390 *mm.*, passa avanti in un secondo strato A B eguale al primo, perchè ogni strato compresso tende ad espandersi nella direzione della minima resistenza, cioè verso quelli non ancora compressi, e così la condensazione si propaga innanzi da uno strato all'altro.

Invece nel primo strato l'' A nasce una *rarefazione*, perchè ritornando la lamina l'' in l', l'aria di detto strato le tien dietro e così si espande. Qui pure la rarefazione sarà massima nel mezzo e minima alle estremità, e si propagherà innanzi negli strati successivi.

Quando una vibrazione è compiuta, tutte le particelle dello strato rarefatto ritornano indietro, tutte quelle dello strato condensato progrediscono innanzi: le prime particelle a contatto della lamina hanno compiuto il ritorno, le mediane (in A) stanno per incominciarlo, e le ultime più lontane (in B) stanno per cominciare l'avanzamento; nei detti tre luoghi vi è perciò riposo nel considerato istante. La condensazione e rarefazione sono massime nei punti di mezzo dei due strati condensato e rarefatto, che corrispondono alle velocità massime della lamina nel mezzo di ciascuna semivibrazione.

Se la lamina facesse una sola vibrazione, una sola condensazione e rarefazione si propagherebbe nella colonna aerea; ma se essa continua a vibrare, ciascuna vibrazione genera una nuova condensazione e rarefazione che tien dietro alla prima, permodochè se la lamina fa, per es., 435 vibrazioni intere per secondo, nascono in questo tempo nel tubo 435 condensazioni, alternate con 435 rarefazioni. Così dopo 2 vibrazioni vi saranno 2 condensazioni in A B, C D, alternate con 2 rarefazioni in l'' A, B C.

Se poi la lamina vibra nell'aria libera, il moto di ciascun punto si propaga in ogni direzione, cioè sfericamente attorno al medesimo. Ciò è attestato dal fatto che un suono si sente tutto all'intorno del corpo vibrante, quantunque possa essere più sentito in una direzione che in un'altra dipendentemente da diverse circostanze.

Quindi nell'aria libera gli strati condensati e rarefatti sono compresi fra superfici sferiche che hanno per centri i diversi punti del corpo sonoro.

9. Moto vibratorio stazionario e progressivo. — Fra le vibrazioni del corpo che genera il suono e quelle del mezzo in cui esso si propaga vi è questa differenza essenziale che, nelle vibrazioni del corpo sonoro tutte le particelle principiano e finiscono le loro vibrazioni contemporaneamente, ed il moto vibratorio è *stazionario*.

Invece nel mezzo in cui si propaga il moto vibratorio ciascuna particella successiva oscilla bensì come la precedente, ma principia e finisce le sue oscillazioni tanto più tardi quanto più è lontana dall'origine del moto ondulatorio, il che costituisce il carattere del moto ondulatorio *progressivo*.

10. Diverse forme di onde. — Nel caso dell'acqua si chiama *onda* l'insieme di un sollevamento e di una depressione contigua.

Nel caso della fune l'onda è costituita dai due spostamenti contigui delle particelle, da una parte e dall'altra della posizione di riposo.

Nel caso del suono l' onda è costituita da due strati aerei contigui, nell'uno dei quali l'aria è condensata, e nell'altro è rarefatta.

In ogni caso ciascuna onda si compone di due semionde, nelle quali le particelle hanno i movimenti contrari delle particelle vibranti che generano un'onda ad ogni vibrazione.

11. Superficie d'onda. — Quando il moto ondulatorio si propaga tutto all'intorno di una particella vibrante le particelle a cui arriva contemporaneamente uno stesso impulso, e che perciò sono nella stessa fase di vibrazione, sono collocate su una superficie, la quale chiamasi *superficie d'onda*, ed è sferica quando la velocità di propagazione è la stessa in tutte le direzioni, come avviene nell'aria tranquilla con temperatura uniforme.

12. Differenze fra le onde sull'acqua e le onde sonore. — Fra le onde che si propagano sulla superficie dell'acqua e le onde sonore sono da notarsi le seguenti differenze:

1° Mentre sull'acqua le onde sono comprese fra circonferenze concentriche, le onde sonore sono comprese fra superfici sferiche concentriche.

In generale, quando non vi è che un centro di scuotimento, la superficie dell'onda in un mezzo omogeneo è sferica. Quando ve ne sono parecchi, appartenenti alla superficie di uno stesso corpo, ciascuno di essi è il centro di onde sferiche, e tutte queste onde parziali si compongono in un'onda unica risultante, la cui superficie è l'avviluppante di tutte le onde parziali che provengono dagli scuotimenti dei diversi punti vibranti. Tale superficie è sensibilmente sferica a una distanza del corpo vibrante assai grande rispetto alle dimensioni di questo, le quali scompaiono rispetto a quelle dell'onda.

2° Nel caso delle onde sui liquidi le particelle si sollevano e si abbassano alternativamente, cioè oscillano perpendicolarmente alla direzione in cui il moto si propaga, e perciò le onde si dicono *trasversali*, mentre in quelle sonore dell'aria le particelle si avvicinano e si allontanano alternativamente, cioè oscillano nella direzione stessa della propagazione, e perciò tali onde si dicono *longitudinali*.

3° Nelle onde superficiali dei liquidi questi non provano cangiamento sensibile di densità, mentre le variazioni di densità,

dovute alle vibrazioni longitudinali, costituiscono il fatto caratteristico delle onde sonore.

13. Propagazione rettilinea del suono. — In un mezzo omogeneo il suono si propaga tutto all'intorno del corpo sonoro, secondo linee rette, che partono da questo e vanno in tutte le direzioni attorno al medesimo.

La propagazione in tutte le direzioni è provata dal fatto che un suono viene sentito tutto attorno al corpo sonoro.

La propagazione rettilinea in un mezzo omogeneo è provata dal fatto che se fra il corpo sonoro e l'orecchio si interpone un corpo non capace di trasmettere il suono, questo più non si ode. L'esperienza si può fare semplicemente collocando un oriuolo o un corista vibrante vicino all'orecchio e poi interponendo replicatamente fra essi un quaderno di carta. Per tale interposizione non si ode più il suono, mentre se questo potesse propagarsi per linee curve potrebbe arrivare all'orecchio lateralmente al corpo interposto.

14. Raggio sonoro. — Ciascuna delle linee lungo le quali avviene la propagazione di un moto ondulatorio si dice *raggio dell'onda*. Nel caso del suono i raggi delle onde sono *raggi sonori*, i quali in un mezzo omogeneo sono linee rette.

15. Ombra sonora. — Come dietro ad un corpo che intercetta la luce vi è uno spazio nel quale questa non può arrivare e che si dice *ombra*, così dietro ad un corpo che non trasmette il suono vi è l'*ombra sonora*. Essa è provata dalla detta esperienza dell'oriuolo (n° 13), ed è sensibile nei rumori delle acque in vicinanza dei ponti e delle case, in cui avvengono repentine variazioni di intensità del suono per causa delle ombre sonore.

Accade talvolta che chi porta un corpo voluminoso sulle spalle non sente il rumore delle vetture che gli si avvicinano, perchè le sue orecchie si trovano nell'ombra sonora prodotta da quel corpo.

16. Lunghezza delle onde. — Ogni vibrazione di un corpo sonoro genera un'onda, e la lunghezza di questa è eguale allo spazio che il moto vibratorio percorre nel mezzo in cui si propaga, nel tempo in cui il corpo sonoro

eseguisce una vibrazione. Ora nel moto uniforme lo spazio s percorso nel tempo t è espresso dalla formola $s = vt$ (pag. 23). Quindi indicando con

v la velocità del suono,
t la durata di una vibrazione,
λ la lunghezza di un'onda,
n il numero delle vibrazioni al secondo,

si ha l'eguaglianza:

$$\lambda = v\,t.$$

E poichè $t = {}^1/_n$ (pag. 255), sostituendo risulta:

$$\lambda = \frac{v}{n}.$$

Dunque *la lunghezza delle onde è data dal quoziente della velocità della propagazione al numero delle vibrazioni.*

17. Differenza fra la propagazione del suono in una sola e in tutte le direzioni. — Tra la propagazione del suono in un tubo o canale e in un mezzo esteso in ogni verso passa poi una differenza essenziale. Nel primo caso ogni strato comunicando il suo movimento ad un altro di eguali dimensioni e quindi di egual numero di particelle rimane costante l'ampiezza delle vibrazioni di queste, fatta astrazione dalla piccola perdita dovuta all'attrito contro le pareti del tubo; invece quando il suono si propaga in un mezzo esteso in ogni verso, come nell'aria libera, il movimento oscillatorio passa successivamente in strati sferici di maggior volume e massa, e perciò le vibrazioni di ogni particella vanno diminuendo di ampiezza. D'onde deriva che nel primo caso il suono perde pochissimo di intensità col crescere della distanza, mentre, come vedremo, nel secondo caso l'intensità decresce coi quadrati delle distanze del corpo sonoro.

§ 82. Riflessione del suono.

1. Riflessione delle onde. — Che cosa avviene sull'acqua quando le onde che si propagano sulla medesima incontrano la spiaggia? Esse ritornano indietro. Tale fenomeno dicesi *riflessione delle onde.*

Quale differenza vi è fra l'onda che procede verso la spiaggia, e quella che ritorna indietro, cioè fra l'onda incidente e l'onda riflessa? Se la spiaggia è piana, il moto ondulatorio si propaga a ritroso colla stessa velocità con cui si propagava innanzi, per modo che le onde riflesse conservano la stessa forma circolare delle onde incidenti, e solo si rovesciano rispetto alla spiaggia,

cioè mentre le onde incidenti rivolgevano a questa la loro convessità, le onde riflesse le rivolgono la loro concavità.

Così pure le onde sonore quando incontrano una parete resistente si riflettono, e se questa è piana, le onde riflesse conservano la forma delle onde incidenti, e solo divengono rovesciate rispetto alla parete.

2. Rappresentazione grafica delle onde incidenti e riflesse. — Per rappresentare graficamente il fenomeno della riflessione delle onde si tira una retta PP′ (fig. 158), la quale rappresenta la parete riflettente, e dal centro sonoro S si abbassa sulla detta retta una perpendicolare SFS′, che si prolunga indefinitamente. Indi con un raggio SC maggiore della distanza SF del centro sonoro dalla parete si descrive un arco ABCDE, continuo nelle due parti AB, DE anteriori alla parete, e punteggiato nella parte posteriore BCD, per rappresentare un'onda che ha incontrato la parete e la quale non ha potuto propagarsi al di là di questa. I due archi continui AB, DE rappresentano le parti dell'onda incidente che non hanno ancora incontrato la parete, e l'arco punteggiato BCD rappresenta la parte mancante all'onda incidente, perchè ha incontrato la parete.

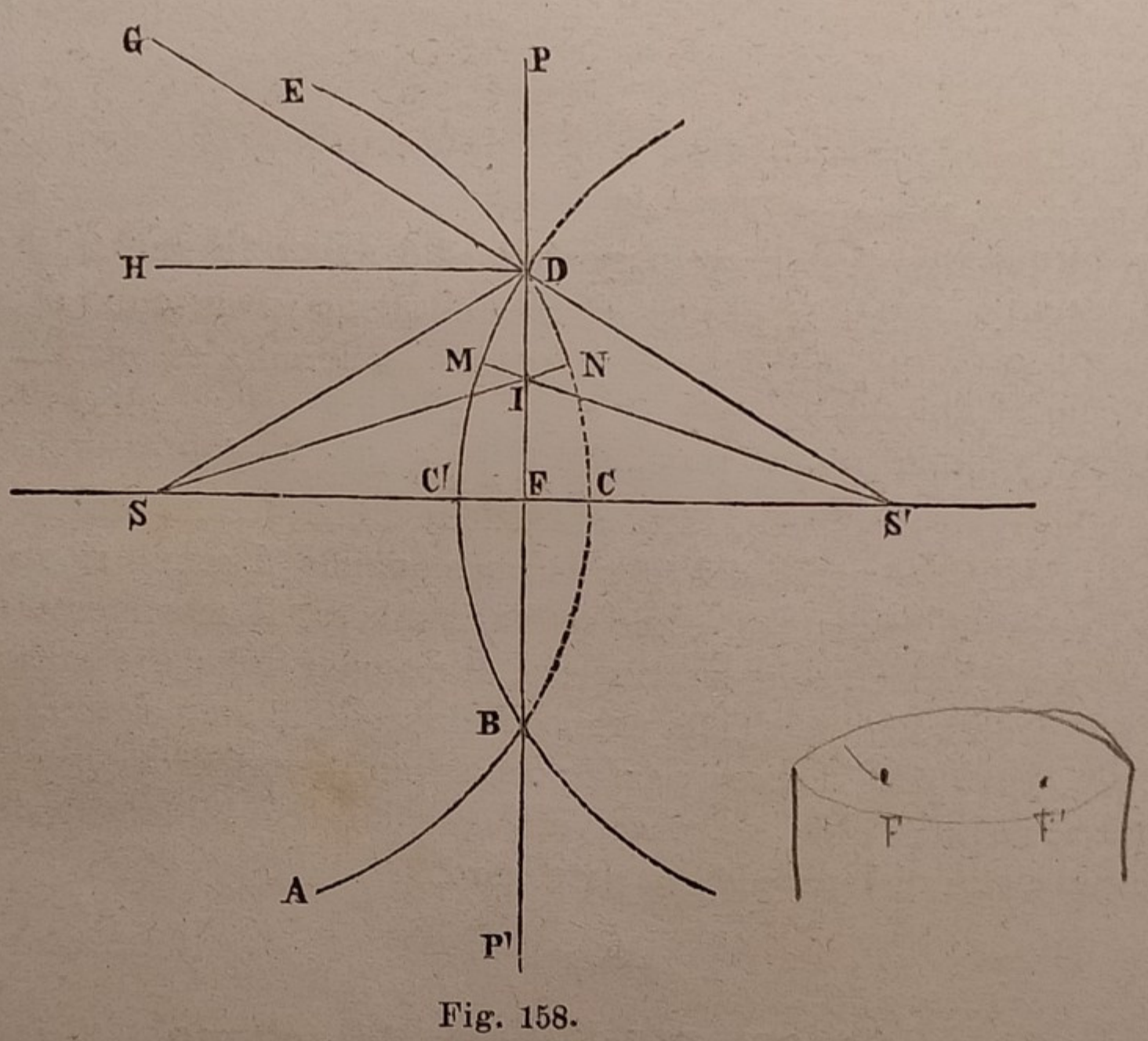


Fig. 158.

Ora, per rappresentare l'onda riflessa basta capovolgere l'arco punteggiato B C D rispetto alla parete. Perciò si prende sul prolungamento di SF un punto S′ simmetrico di S, cioè collocato sulla stessa perpendicolare e ad eguale distanza dalla linea PP′. Quindi fatto centro in S′, con un raggio S′D = SD, si descrive l'arco continuo B C′ D, prolungandolo punteggiato oltre i punti B e D. La parte continua B C′ D di tale arco rappresenta l'onda riflessa, che è eguale all'onda incidente B C D, colla sola differenza che è rovesciata rispetto alla parete.

3. Leggi della riflessione delle onde. — Rammentiamo dapprima che si dice raggio sonoro ogni linea lungo la quale avviene la propagazione del moto ondulatorio sonoro. Così se A B C D E (fig. 158) rappresenta un'onda sonora, ogni linea S D, S C, ecc., che congiunge il centro sonoro con un punto qualunque D, C, ecc., della superficie dell'onda, è una linea di propagazione del moto ondulatorio sonoro, cioè un raggio sonoro. Di più, il raggio S D dell'onda incidente si dice *raggio incidente*, e il raggio S′ D dell'onda riflessa chiamasi *raggio riflesso*.

Ora, se si prolunga il raggio riflesso S′ D in G, e poi pel punto D si conduce una retta H D perpendicolare alla parete riflettente P′P, risultano i due angoli HDS, HDG. Il 1°, formato dal raggio incidente SD e dalla perpendicolare o normale DH, si dice *angolo d'incidenza*, e il 2°, formato dal raggio riflesso S′DG colla stessa normale, chiamasi *angolo di riflessione*.

Infine, si scorge facilmente che l'angolo di riflessione H D G è eguale all'angolo d'incidenza H D S, perchè complementari dei due angoli G D P, S D F, eguali fra loro perchè ambidue eguali all'angolo F D S′.

Di più, il raggio riflesso S′DG avendo i 2 punti S′, D comuni colle due parallele SS′, HD, si trova nel piano di queste, il quale contiene l'angolo d'incidenza S D H.

D'onde risultano le seguenti *leggi generali della riflessione del moto ondulatorio.*

1° *L'angolo di riflessione è uguale all'angolo d'incidenza:*

2° *Il raggio riflesso e il raggio incidente si trovano dalla stessa parte della superficie riflettente, ma dall'opposta*

parte della normale, e il raggio riflesso giace nel piano determinato dalla normale e dal raggio incidente.

Quindi, per avere la direzione di un altro raggio sonoro incidente qualunque S I dopo la riflessione, basta tirare una retta S′ I pel centro S′ delle onde riflesse e pel punto d'incidenza I.

Se il raggio incidente ha la direzione S F perpendicolare alla superficie riflettente, il corrispondente raggio riflesso ha la direzione S′ F della stessa perpendicolare.

4. Osservazione generale intorno alla riflessione delle onde. — In generale, quando un moto ondulatorio arriva alla superficie di separazione di due mezzi si scompone in due, l'uno dei quali si propaga nel secondo mezzo, e l'altro ritorna indietro nel primo. Questo è tanto maggiore dell'altro quanto maggiore è la densità ed elasticità del secondo mezzo; perciò i muri riflettono meglio delle pareti di legno e queste più delle stoffe, le quali assorbono il suono.

5. Prove sperimentali delle leggi della riflessione delle onde sonore. — Se nel foco (F, fig. 159) di uno specchio parabolico (*) si colloca un orologio, i raggi sonori che partono da quello, dopo la riflessione sullo specchio, si dirigono parallelamente all'asse del medesimo, cioè alla retta (VX) che passa pel vertice (V) e pel foco (F) di esso, poichè, siccome dimostra la geometria, i raggi che partono dal foco e quelli paralleli all'asse fanno angoli eguali colle rette (BT, BT′) tangenti alla superficie

---

(*) Se si pone un cono a contatto con una tavola per un suo lato, e poi si taglia con un piano parallelo al lato stesso o alla tavola, la curva di intersezione del piano colla superficie conica è quella che i geometri chiamano *parabola*. Più il taglio è alto, cioè lontano dal vertice del cono, e più dolce è la curvatura della risultante curva parabolica; invece questa è assai curva o aguzza se il taglio si fa vicino al vertice del cono. Tale curva ha un asse di simmetria, che si dice l'asse della parabola. Se si fa girare la curva attorno all'asse, essa genera una superficie parabolica, pure simmetrica rispetto all'asse.

I geometri *definiscono la parabola: una curva i cui punti sono egualmente distanti da un punto* (F, fig. 159) *detto foco e da una retta* (D D′) *detta direttrice*. La si può costruire per punti.

Costruzione della parabola per punti. Dal foco F si abbassa la perpendicolare F E sulla direttrice D D′, si divide quella per metà nel punto V, che appartiene alla parabola, perchè egualmente distante dalla direttrice D D′ e dal foco F. Tale punto si dice *vertice* della parabola, e la retta indefinita E F X ne è l'*asse*.

Per determinare altri due punti qualunque si tira una perpendicolare alla retta E F X fra V e X, quindi fatto centro nel foco F, con un raggio eguale alla distanza della detta perpendicolare dalla direttrice, si interseca quella in due punti, l'uno superiore, l'altro inferiore all'asse E X, i quali apparteranno alla parabola perchè egualmente lontani dal foco e dalla direttrice.

parabolica dello specchio, e quindi anche colle normali (NA, NC) condotte pei punti d'incidenza dei raggi.

Quindi, se si dirige l'asse dello specchio in direzioni diverse, le persone che trovansi in tali direzioni sentono il *tic-tac* di un oriuolo posto al foco dello specchio, mentre quelle che si trovano fuori di quelle direzioni non lo sentono,

Inversamente, se i raggi sonori (Y A, Z C, ecc.) cadono sullo specchio parallelamente all'asse principale, essi dopo la riflessione passano pel foco (F).

Perciò, se i raggi sonori riflessi dal primo specchio parallelamente al suo asse si fanno cadere su di un secondo specchio concavo parabolico collocato di fronte al primo, si sente benis-

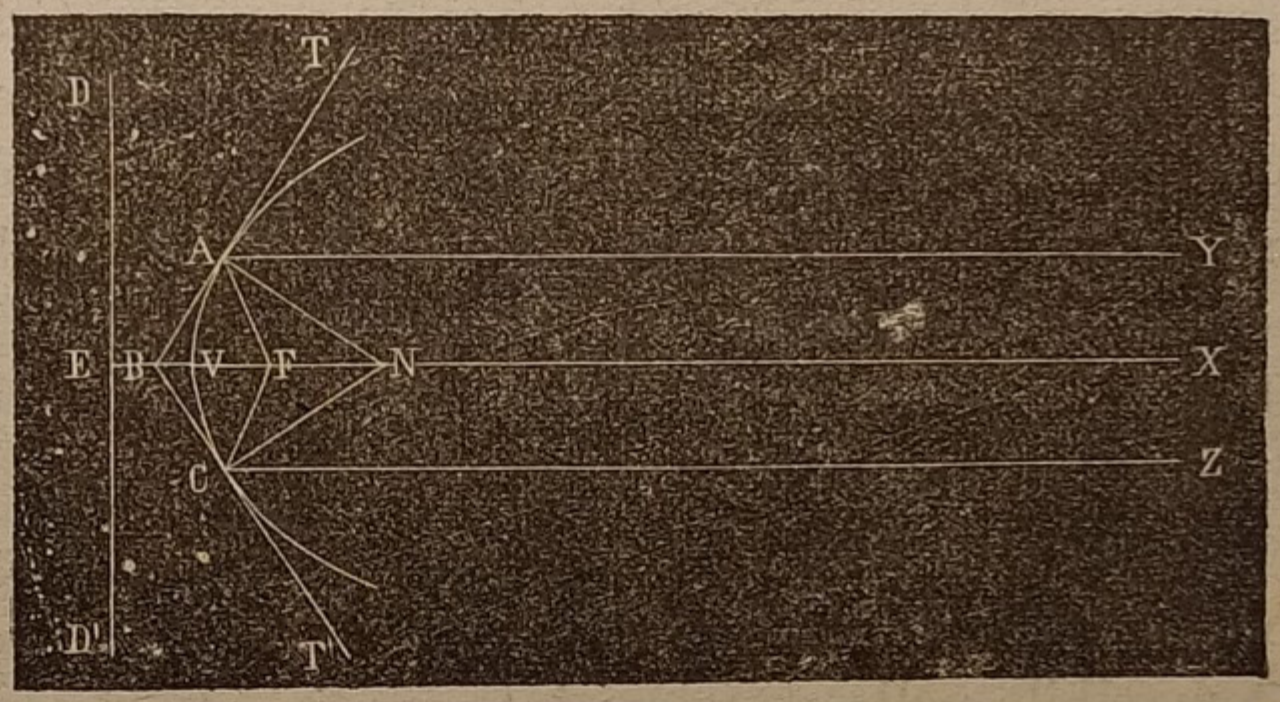


Fig. 159.

simo il *tic-tac* nel foco di questo secondo specchio, anche alla distanza di molti metri, mentre non lo si sente fuori di quel punto. Perchè l'esperienza riesca bene, conviene farla in luogo silenzioso. E per non intercettare i raggi sonori colla testa, si può collocare al foco il padiglione d'un cornetto acustico (pag. 279), cui si attacca un tubo di gomma che conduce il suono nell'orecchio.

6. Gabinetti parlanti. — Altra prova sperimentale delle leggi della riflessione delle onde sonore sono i cosidetti *gabinetti parlanti*, che sono camere la cui vôlta ha figura elittica (fig. 160). In questi le parole pronunziate in uno dei punti F, F′ detti *fochi*, a voce bassa, si intendono distintamente nell'altro foco, mentre non si odono fuori di questo, perchè i raggi sonori F A, F B, F C che partono da F, riflettendosi sulla superficie elittica della

vôlta, pigliano la direzione A F′, B F′, C F′, per cui vengono a passare esattamente per l'altro foco.

Infatti, dimostra pure la geometria, che i raggi vettori condotti dai due fochi (F, F′) ad un punto qualunque (A, B, C) della curva fanno angoli eguali colle tangenti condotte pei punti di incidenza, e quindi anche colle normali passanti per gli stessi punti.

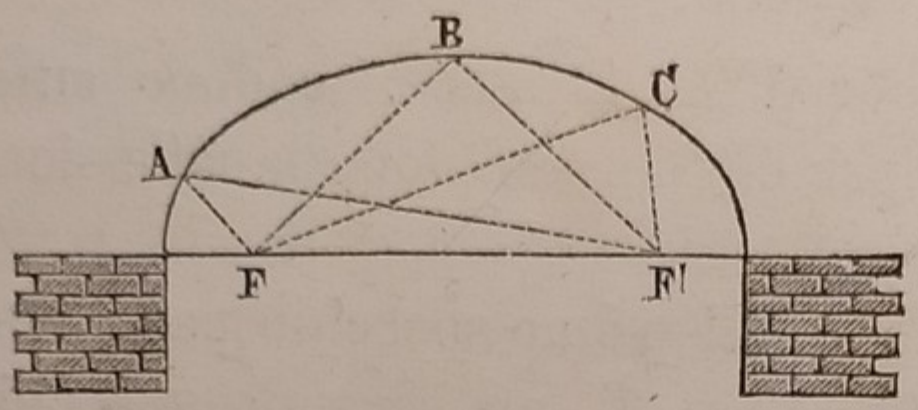


Fig. 160.

Un esempio di tale costruzione si incontra in una sala del Conservatorio di arti e mestieri a Parigi.

Lo stesso fenomeno può anche essere prodotto dagli archi elittici dei ponti. Lo si ode, ad es., sotto il ponte della Dora a Torino; e si presenta anche nelle cupole di certe chiese, come in quella di S. Pietro a Roma e di S. Paolo a Londra, nelle quali le persone collocate all'estremità di un diametro della galleria possono discorrere a voce bassa senza essere udite dalle persone intermedie.

Così pure, nel teatro di Magonza (Mainz) due persone collocate nei palchi opposti del 2° ordine possono conversare fra loro in mezzo al rumore dell'intervallo tra un atto e l'altro, mentre ciò non è possibile nelle posizioni intermedie.

§ 83. L'eco.

1. Fenomeno e causa. — Tutti conoscono il fenomeno dell'*eco*, cioè della *ripetizione di un suono*, prodotta da un muro, od altra superficie alquanto estesa, come quella di un monte, di una vela, ecc. Tal fenomeno è dovuto alla riflessione delle onde sonore sulla superficie dei corpi alquanto estesi.

2. Eco mono e polisillaba. — L'eco si distingue dapprima in *monosillaba* o *polisillaba*, secondochè ripete solo l'ultima sillaba di una parola o più sillabe. A Galbiate, in Brianza, vi è un'eco che ripete distintamente due versi endecasillabi.

Si ha l'eco *monosillaba* quando la distanza della superficie riflettente è di 34 *m.*; *bisillaba* quando la detta distanza è $34 \times 2 = 68$ *m.*: *trisillaba* quando è $34 \times 3 = 102$ *m.*, ecc.

Il che si spiega osservando che la percezione di una sillaba richiede circa $^1/_5$ di secondo, cioè l'orecchio umano non può percepire distintamente più di 5 sillabe per secondo. Ciò si può verificare misurando il tempo impiegato a leggere in modo chiaro un dato numero di versi endecasillabi; se la lettura viene affrettata in modo che vengano pronunciate più di 5 sillabe per secondo, queste non sono più intese distintamente. Perciò se l'eco della sillaba pronunciata arriva all'orecchio prima che sia trascorso $^1/_5$ di 1 secondo esso si confonde col suono diretto e non si percepiscono due sillabe distinte, ma una sola rinforzata. Siccome ora in $^1/_5$ di secondo il suono percorre $^{340}/_5 = 68$ *m.*, alla temperatura di 15°, se la parete riflettente è alla distanza di 34 *m.*, le onde sonore debbono percorrere nell'andata e nel ritorno $34 \times 2 = 68$ *m.*, nel che fare impiegano appunto $^1/_5$ di 1 secondo. Il suono riflesso arriva perciò all'orecchio quando è cessata l'impressione del diretto, e si distingue da questo, cioè si ha l'eco monosillaba.

In doppia lontananza si percepisce un'eco bisillaba, ecc.

Pei suoni di breve durata, come, ad es., pel breve rumore prodotto dall'urto di due sassi, si può avere eco a distanza minore di 34 metri, ovvero, a tale distanza, si può sentire l'eco di due o tre colpi dati in fretta.

3. Eco multipla o polifona. — Infine, l'eco si dice *multipla* o *polifona* quando ripete più volte lo stesso suono, che può essere di una o più sillabe, ovvero un rumore qualunque, per es. quello prodotto battendo insieme le mani, o sparando una pistola.

L'eco multipla avviene quando stanno di fronte più superfici riflettenti, per es., due muri paralleli, su cui le onde sonore si riflettono successivamente più volte. Ad ogni ripetizione però il suono si indebolisce, cosicchè pare ripetuto da una persona che fugge colla velocità del suono.

Sotto il lungo arco del ponte sulla Dora a Torino, fra i due muri di fronte, un suono viene ripetuto da 15 a 20 volte.

Esempio famoso di eco multipla si ha nel cortile rettangolare della villa Simonetta presso Milano, il quale è chiuso da tre muri elevati, e aperto da un lato. Allorchè si tira un colpo di pistola dalla grande finestra esistente nel muro del piano supe-

riore dell'ala sinistra, l'eco ne ripete il rumore da 40 a 50 volte. Il suono della voce è ripetuto da 24 a 30 volte. Anzi, sul muro della villa sta scritto: *Celebre eco che ripete* 40 *volte la parola e un colpo di fucile* 75 *volte.*

Esempi celebri di eco multipla sono pure: quello della rotonda piazza reale a Cassel che ripete una parola di una sola sillaba 9 volte, quella di Loreleyfelsen al Reno che ripete 17 volte una sillaba; in Adersbak in Boemia evvi una tripla eco di 7 sillabe.

Il fenomeno dell'eco multipla è manifestamente analogo a quello che avviene per la luce fra due specchi piani paralleli, che presentano una serie indefinita di immagini collocate l'una dietro l'altra, per la riflessione successiva delle onde luminose, dall'uno all'altro specchio.

4. Rimbombo. — In una stanza ordinaria, per causa della grande vicinanza delle pareti, le onde sonore riflesse colpiscono il nostro orecchio quasi nello stesso tempo delle onde dirette, perciò non si distinguono da queste, ma operano solo un rinforzo del suono in confronto della sua intensità all'aria libera.

Nei grandi saloni, per la maggiore distanza delle pareti, le onde sonore riflesse giungono all'orecchio alquanto più tardi, senza tuttavia lasciarsi nettamente distinguere dalle originarie onde sonore, e formano il così detto *rimbombo*, il quale nel parlare, cantare, ecc., copre le sillabe successive e le nasconde all'orecchio.

L'evitare tale inconveniente del rimbombo costituisce un problema difficile pei costruttori dei grandi ambienti, siccome chiese, parlamenti, teatri. Le regole per raggiungere tale scopo non sono ancora note. Un salone pare essere tanto più acustico quanto più irregolari sono le riflessioni sulle sue pareti; quindi sono da evitarsi le grandi superfici di curvatura regolare, ma conviene invece procurare che vi sieno molte interruzioni.

Si giunge a distruggere più o meno completamente il rimbombo e l'eco che impedisce la percezione della parola nei grandi locali, come nelle chiese, mediante tende opportunamente collocate.

§ 84. Intensità del suono.

1. Caratteri dei suoni. — Nei suoni si distinguono tre caratteri, cioè la *intensità*, l'*altezza* e la *tempera* o *metallo*. In questo paragrafo si tratta del 1° carattere.

2. Intensità. — A parità di distanza dall' orecchio il suono di una campana è più sensibile di quello di un campanello, e così pure il rumore prodotto dallo sparo di un cannone è più sensibile dello sparo di uno schioppo.

Dunque i suoni possono impressionare più o meno energicamente l'orecchio. Tale carattere chiamasi intensità. Questa dipende da parecchie cause.

3. Cause da cui dipende l'intensità del suono. — 1° *L'ampiezza delle vibrazioni.* — Quando si scuote una corda, od un corista, od una campana, ecc., il suono si sente dapprima più intenso e poi sempre meno, a misura che diminuisce l'ampiezza delle vibrazioni del corpo sonoro, perchè il suo moto si comunica ai sostegni ed all'aria, e quindi diminuisce nel medesimo.

Dunque *l' intensità del suono diminuisce col diminuire dell'ampiezza delle vibrazioni del corpo sonoro.*

Considerando poi, che l'effetto meccanico di cui è capace una massa in movimento è proporzionale alla sua energia cinetica, o forza viva $^1/_2\ mv^2$, cioè proporzionale alla metà del prodotto della massa pel quadrato della sua velocità (pag. 119), e che il suono è in noi una scossa dei nostri nervi acustici prodotta dalle vibrazioni del corpo sonoro, parrebbe si dovesse concludere che la diversa intensità della sensazione sonora è proporzionale alla forza viva del corpo vibrante, e per conseguenza al quadrato della ampiezza di oscillazione; ma dalle ultime ricerche fatte in proposito l'intensità della sensazione sonora risulterebbe invece *proporzionale alla quantità di moto e quindi alla semplice ampiezza d'oscillazione.*

Ciò però vale solo finchè si confrontano suoni di uguale altezza, ma non per suoni di diversa altezza perchè l'orecchio non è per essi ugualmente sensibile.

A parità di ampiezza, i toni alti riescono più intensi che i gravi, cosicchè quelli possono perfino divenire penosi; infatti, quando si producono suoni acuti e gravi, soffiando con forza costante in una sirena, i primi risuonano più intensi.

2° *La distanza dell'orecchio dal corpo sonoro.* — A tutti è noto che l'intensità del suono diminuisce col crescere della distanza dell'orecchio dal corpo sonoro, e che per sentire meglio i suoni deboli bisogna avvicinare l'orecchio alla sorgente dei medesimi. Ora, la Fisica insegna la legge precisa con cui diminuisce l'intensità dei suoni col crescere della distanza, la quale è la seguente, identica a quella dell'attrazione universale (pag. 31).

L'*intensità del suono decresce coi quadrati delle distanze dal corpo sonoro*, cioè:

alle distanze	1,	2,	3,	ecc.
le *intensità del suono* sono proporzionali ai numeri	1,	$^1/_4$,	$^1/_9$,	ecc.

E ciò avviene perchè, quando il suono si propaga in tutte le direzioni attorno al corpo sonoro, il moto vibratorio di questo si comunica alle particelle aeree collocate sopra superfici sferiche di raggio crescente colla distanza. Ora, la Geometria insegna che

le superfici sferiche *coi raggi* .	1,	2,	3,	ecc.
hanno *grandezze* proporzionali ai numeri	1,	4,	9,	ecc.

cioè che *le superfici sferiche crescono coi quadrati dei raggi.* Perciò l'energia cinetica sonora dovendosi comunicare a particelle d'aria, il cui numero cresce col quadrato della distanza, a ciascuna di esse tocca una parte di quella, la cui grandezza decresce nella stessa misura.

Non si può provare tale legge sperimentalmente pel suono, perchè non si ha alcun istromento per misurare l'intensità del medesimo, e il nostro orecchio, come in generale i nostri sensi, non sono stromenti di misura. Ma l'esperienza quotidiana ci insegna che l'intensità del suono decresce col crescere della distanza.

3° *Densità del mezzo.* — Quando si fa l'esperienza della sveglia o del campanello nel vuoto (pag. 257), si osserva che, a misura che si lascia rientrare l'aria nel recipiente entro cui si trova il corpo sonoro, il suono si rinvigorisce. E sulle alte montagne ove l'aria è rada, lo sparo di uno schioppo produce rumore meno forte che in basso; all'incontro, nell'aria assai fredda e densa, e sulla superficie dei mari delle regioni polari, i suoni sono

più intensi, e sono intensissimi nell'aria compressa della campana dei palombari.

Dunque l'intensità del suono dipende dalla densità del mezzo in cui esso si propaga.

4° *La superficie del corpo sonoro.* — Se si scuote un corista e lo si tiene nell'aria pel suo piede, il suo suono è così debole che per sentirlo bisogna avvicinarlo all'orecchio. Ma se si colloca il piede in contatto con una cassa armonica, od anche una tavola che ne fa le veci, allora il suono si sente più intenso, perchè la cassa piglia parte al moto vibratorio del corista, e l'aria viene scossa da un numero assai maggiore di particelle vibranti.

Parimenti gli stromenti a corde sono muniti di casse armoniche che ne rinforzano il suono, il quale senza di esse sarebbe assai debole.

Dunque *l'intensità del suono dipende dall'estensione della superficie del corpo sonoro.*

5° *La tranquillità ed omogeneità del mezzo in cui il suono si propaga.* — In generale, a parità di distanza, nella notte i suoni si sentono più intensi che nel giorno, sia perchè l'aria è più tranquilla, sia perchè è più omogenea, cioè presenta meno variazioni di densità, non essendo esposta ad ineguali riscaldamenti come durante il giorno, e alla superficie di separazione di due mezzi di diversa densità avviene una riflessione parziale delle onde sonore.

Dunque: *l'intensità del suono dipende dalla tranquillità ed omogeneità del mezzo in cui il suono si propaga.*

6° *L'intensità del suono dipende dal numero delle direzioni nelle quali il suono si propaga*, perchè, quanto maggiore è tal numero, tanto più estesi sono gli strati del mezzo, nei quali si distribuisce la forza viva che parte dal centro sonoro, d'onde risulta tanto minore in ciascuna direzione l'intensità del suono.

Infatti, mentre nell'aria libera l'intensità del suono decresce col quadrato della distanza dal centro sonoro, invece *in un tubo cilindrico*, lungo il quale il suono è costretto a propagarsi in una sola direzione, l'*intensità del suono decresce solo lentissimamente colla distanza*, e non decrescerebbe punto se il movi-

mento sonoro non si comunicasse alquanto alle pareti del tubo. Biot trovò che alla estremità di un tubo di ghisa lungo 931 *m.* poteva tenere una conversazione a voce bassa con una persona posta all'altra estremità.

7° Infine *l'intensità del suono dipende dalla sensibilità dell'orecchio.*

L'orecchio è tanto più sensibile quanto meno è disturbato da altri suoni; così nel giorno l'orecchio assordato dai continui rumori percepisce i suoni deboli meno distintamente che nella notte. Il riposo degli altri sensi affina pure quello dell'udito; cogli occhi chiusi, ovvero per la perdita della vista, si ode meglio.

4. Tubi parlanti. — Sul fatto esposto nel n° 6° sono fondati i *tubi parlanti*, tubi di latta o di caucciù, del diametro di pochi centimetri, i quali servono a parlare a bassa voce da un piano all'altro di un vasto edifizio, come pure sulle navi.

Però, l'intensità del suono decresce nei tubi stretti, e tanto più quanto minore ne è il diametro.

5. Portavoce e cornetto acustico. — Sulla propagazione del suono in una sola direzione sono anche fondati il *portavoce* e il *cornetto acustico.*

Il *portavoce,* che serve a parlare a grandi distanze, consiste in un tubo di metallo leggermente conico, e più o meno lungo, il quale all'estremità più stretta ha una piccola dilatazione detta *imboccatura,* cui si applica la bocca, mentre all'estremità più ampia ha una dilatazione conica assai aperta, che dicesi *padiglione.*

Parlando nel tubo mediante l'imboccatura, la voce può arrivare a distanze assai maggiori di quelle a cui arriva parlando nell'aria libera, le quali crescono col crescere delle dimensioni dell'apparecchio.

Serve sovratutto sul mare per parlare da una nave all'altra a distanza. Quelli usuali di rado raggiungono i 2 metri; ma in Inghilterra se ne sono costrutti alcuni lunghi 7 metri, coi quali si è potuto trasmettere la parola a 4 chilometri.

Alcuni attribuiscono il rinforzo del suono a ciò, che mediante l'apparecchio viene messa in oscillazione una più grande quantità di aria. Tutta la massa aerea del portavoce viene scossa come se

si trovasse nella bocca; egli è come se parlasse una persona avente una bocca centinaia di volte maggiore.

Altri attribuiscono questo rinforzo alla riflessione dei raggi sonori sulle pareti coniche del portavoce nella direzione del suo asse.

Però la riflessione sulle pareti non spiega l'effetto del padiglione, perchè i raggi sonori per riflettersi sulle pareti del medesimo dovrebbero piegarsi verso l'esterno. Ora, l'esperienza prova che il padiglione ha grande influenza.

Il *cornetto acustico* è uno stromento che serve per parlare ai sordi. Se ne costruiscono di molte forme, ma in generale consistono in un tubo conico, diritto o ricurvo, alla cui estremità più dilatata si applica la bocca di chi parla, mentre la estremità più stretta viene applicata nell'orecchio di chi ascolta.

In questo caso, le onde sonore non solo vengono impedite di diffondersi e così di affievolirsi, ma vengono ancora concentrate in breve spazio, alla estremità applicata all'orecchio, cosicchè il moto vibratorio ivi diviene più ampio.

§ 85. **Altezza dei suoni.**

1. Altezza dei suoni. — Nella musica si distinguono i suoni in *alti* o *acuti*, e *gravi* o *bassi*, secondo una diversa impressione che essi fanno nell'orecchio, e l'acustica insegna che la causa di questa diversa impressione, denominata *altezza dei suoni*, è il diverso numero di vibrazioni eseguite dal corpo sonoro nell'unità del tempo, ossia che: i suoni sono *acuti* o *gravi* secondochè il corpo sonoro eseguisce un maggiore o minor numero di vibrazioni nell'unità di tempo, il che si prova con diverse esperienze.

2. Esperienza con un ferro da calze. — Un ferro da calze fisso in un punto e fatto vibrare dà un suono tanto più acuto quanto minore è la lunghezza della parte vibrante, perchè col diminuire della lunghezza cresce la celerità del suo moto vibratorio, come avviene nel pendolo.

3. Esperienze colla sirena semplice. — Si prova lo stesso fatto mediante un apparecchio detto *sirena*, che nella sua forma

più semplice (fig. 161) consiste in un disco circolare di metallo o di cartone, fornito di una o più serie di fori disposti in circonferenze concentriche. Lo si fissa ad un asse di rotazione e si fa girare; indi con un mantice e un tubo di gomma elastica terminato da un tubetto conico, di vetro o di metallo, si soffia aria contro la serie dei fori del disco girante, e così risulta un suono, perchè quando l'aria che esce dal tubo incontra un foro passa al di là del disco e va ad urtare la massa aerea posteriore; quando invece l'aria soffiata incontra un intervallo fra due fori non può urtare l'aria al di là del disco, la quale per elasticità ritorna indietro, e così vibra. Ora, il suono diviene tanto più acuto quanto maggiore è la velocità di rotazione del disco, perchè con questa cresce il numero delle vibrazioni eseguite dall'aria in un dato tempo. E se il disco è munito di più circonferenze di fori, facendolo girare con velocità costante, si ottengono suoni più acuti dalle serie più esterne ove quelli sono più numerosi, perchè maggiore è allora il numero delle vibrazioni dell'aria.

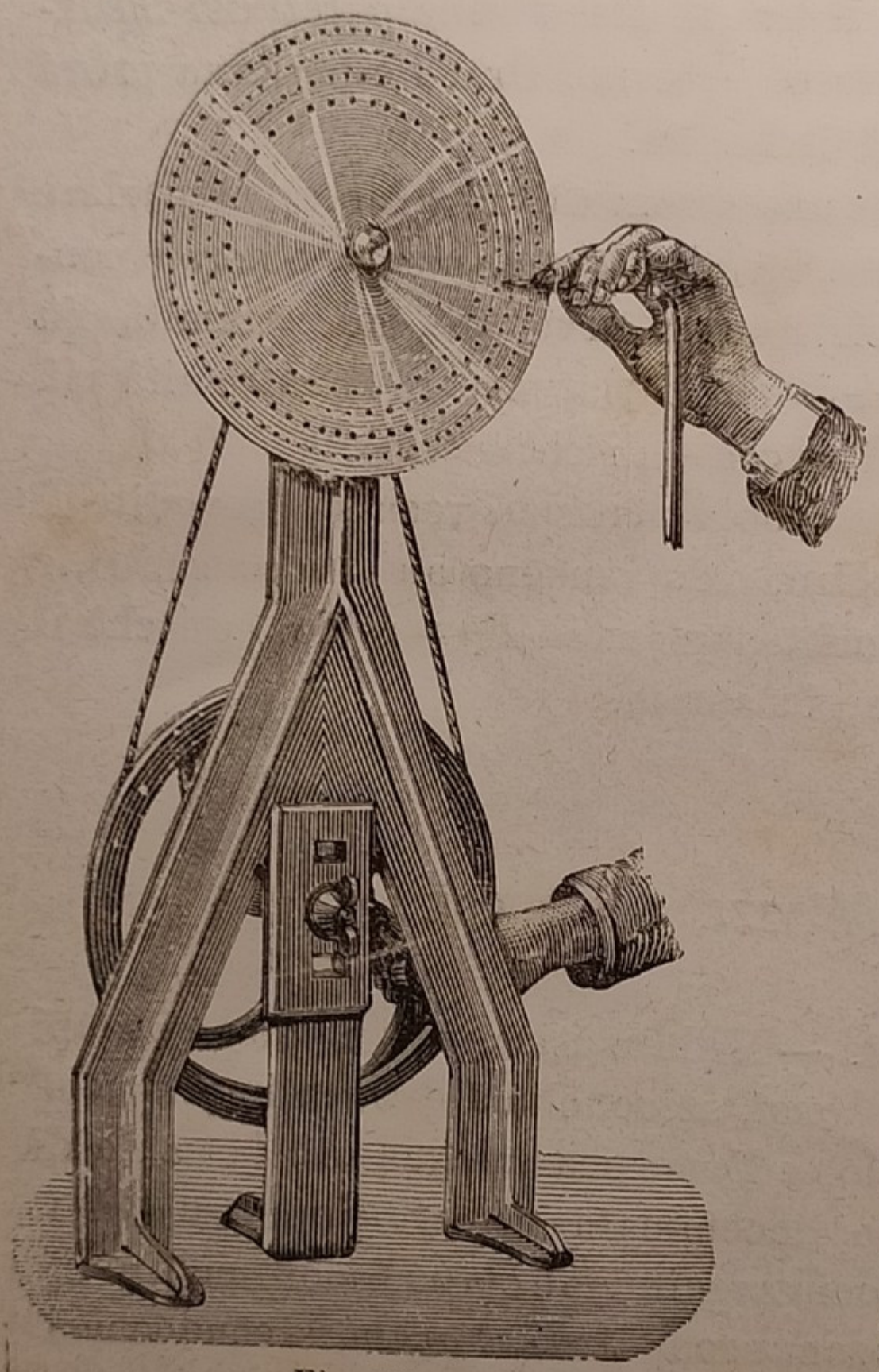


Fig. 161.

4. Esperienze colla sirena composta. — Si ottiene un suono più forte mediante la *sirena composta* di Cagniard-Latour (1825) (fig. 162). Essa è costituita: da un *disco metallico* orizzontale (G), girevole attorno ad un asse verticale (A) di acciaio, e munito di fori disposti in circonferenza, che attraver-

sano il disco obliquamente alle sue due basi; al disotto evvi una *cassa*, o *tamburo cilindrico* (T), di metallo, munito inferiormente d'un piede cavo (P), il quale può essere applicato su un mantice (come quello rappresentato dalla fig. 164) e ricevere così una corrente d'aria, mentre superiormente è chiuso da un disco metallico fisso (F), traversato pure da tanti fori quanti sono quelli del disco girevole superiore; però i fori dei due dischi, mobile e fisso, hanno obliquità contraria, permodochè quando si cor-

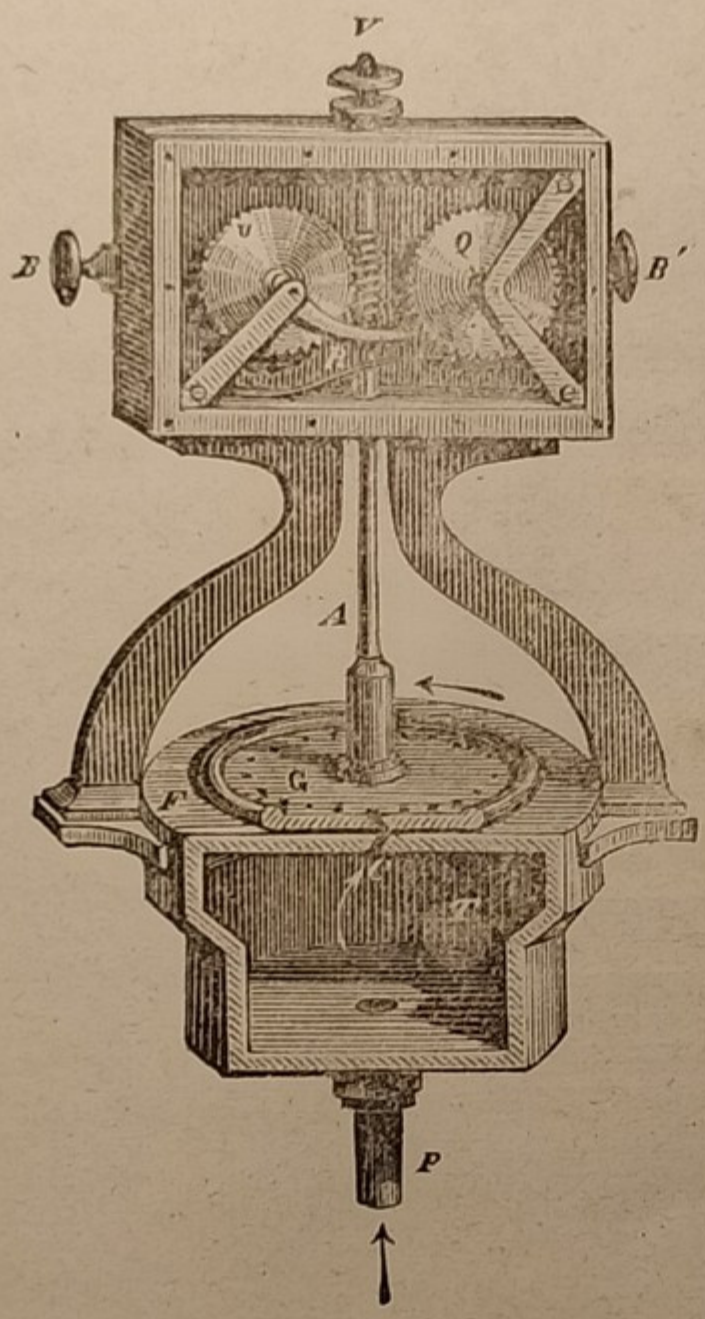


Fig. 162.

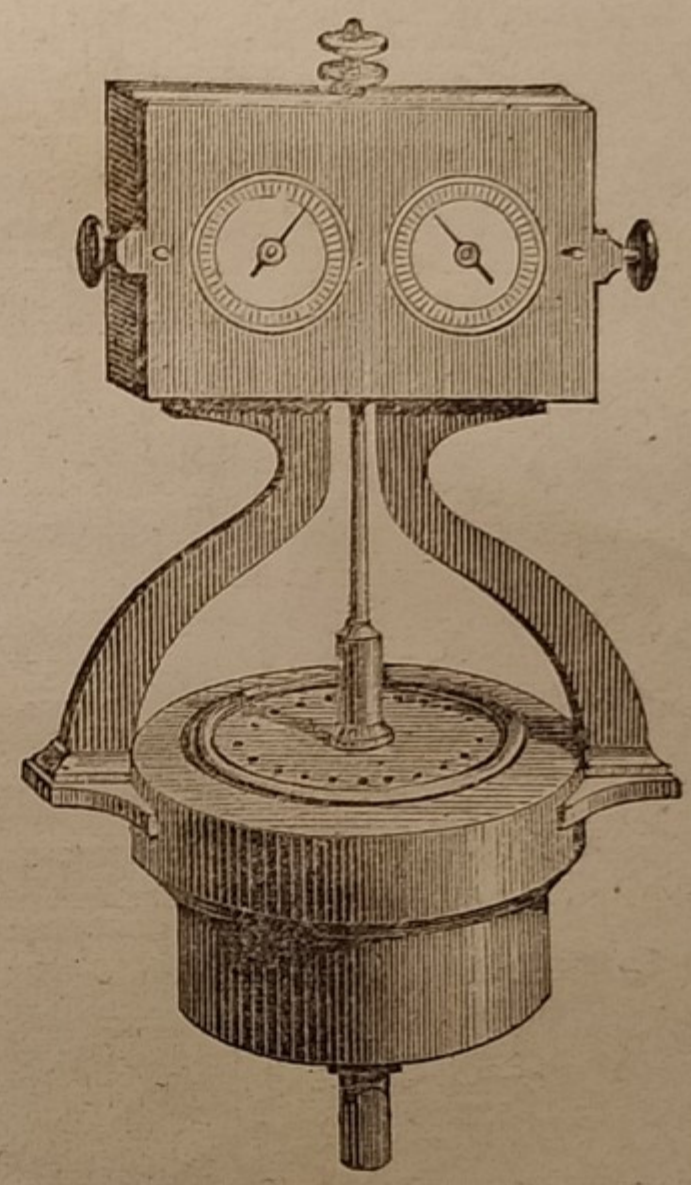
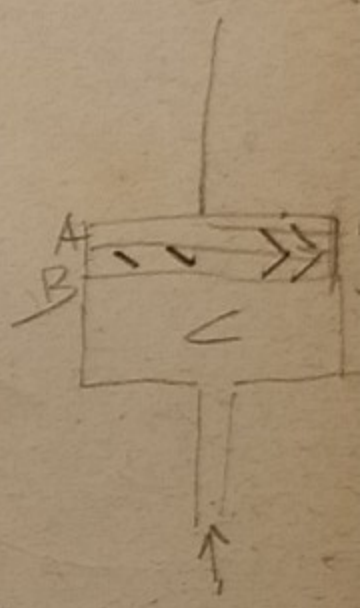


Fig. 163.



rispondono, risulta un canale angolare (*c*); infine l'apparecchio è munito superiormente di un *contatore* (BB′) mediante il quale si può determinare il numero dei giri fatti dal disco mobile.

Perciò l'asse del disco girevole è fatto superiormente a *vite perpetua*, le cui spire ingranano nei denti di una ruota dentata (*v*) con 50 o 100 denti. Questa ruota che gira così di un dente ad ogni giro del disco porta un braccio (R) il quale a ciascun giro di essa fa avanzare di un dente una seconda ruota (Q). Gli assi delle due ruote portano (sulla faccia opposta a quella rappresentata dalla fig. 162) un indice mobile su un piccolo qua-

drante (fig. 163), diviso in 50 o 100 parti eguali, secondo il numero dei denti di quelle. L'indice portato dall'asse della 1ª ruota indica il numero dei giri del disco fino a 50 o 100, secondochè essa ha 50 o 100 denti, e l'indice fisso all'asse della 2ª ruota indica il numero dei giri della 1ª, e quindi le cinquantine o centinaia di giri del disco.

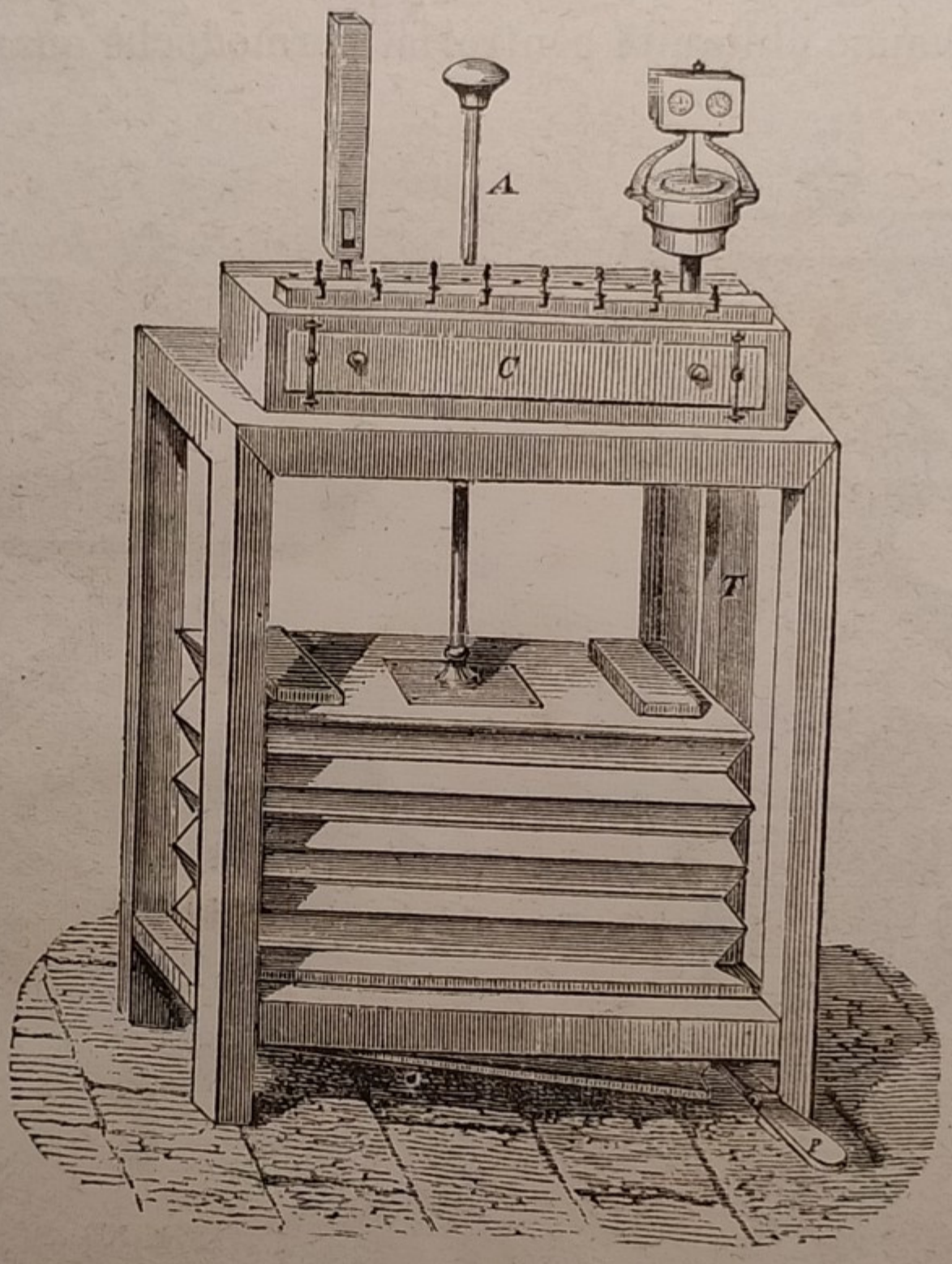


Fig. 164.

Spingendo un bottone (B, fig. 162) si fa ingranare la ruota (*v*) che gira d'un dente per ogni giro del disco, nella vite perpetua, e così si mette in azione il contatore. Invece tirando indietro il detto bottone si toglie l'ingranaggio, e così si arresta il contatore nell'istante che si vuole.

Si dispone ordinariamente la sirena su d'un mantice (fig. 164), che mediante un pedale (P) si gonfia di aria; questa, spinta da pesi che gravitano sulla faccia superiore del mantice, e all'occorrenza da una pressione che si esercita appoggiando la mano su

di un'asta (A), per un tubo (T) viene nella cassa (C), la cui parete superiore è munita di 8 fori chiusi da valvole, che si possono aprire spingendo in basso i corrispondenti bottoni (che si veggono superiormente). Si applica il piede della sirena ad uno dei detti fori, che si apre spostando la valvola corrispondente.

Se ora viene soffiata aria nel tamburo, questa uscendo dai fori della sua parete superiore e urtando obliquamente contro quelli del disco girevole lo mette in rotazione, cosicchè tutti i fori restano successivamente chiusi ed aperti, e l'aria soffiata uscendo ad intervalli mette in vibrazione quella esterna; donde risulta un suono, il quale è assai più intenso di quello della sirena semplice, perchè l'aria esterna viene urtata simultaneamente per tutti i fori dei due dischi e non per un solo, come avveniva in quella.

Così, se il disco mobile e quello fisso hanno 20 fori, quando il primo gira, l'aria soffiata dal mantice uscendo interrottamente pei medesimi scuote l'aria esterna in 20 punti e la fa vibrare. Ma il numero delle vibrazioni eseguite per ogni giro del disco mobile è sempre solo eguale al numero dei fori di questo, e non viene moltiplicato per il numero dei fori del disco fisso, il quale solo moltiplica l'intensità della vibrazione, come se si facessero vibrare contemporaneamente 20 corde all'unisono invece di una sola.

Ora, continuando a soffiare aria nella sirena, il disco mobile superiore gira con rapidità crescente, fino ad un certo limite, e contemporaneamente si sente il suono divenire sempre più acuto; inversamente, quando il disco ha acquistato la massima velocità possibile, se lo si tocca replicatamente col dito in modo da diminuire successivamente la sua velocità di rotazione, si sente una serie di suoni sempre più gravi.

5. Esperienze con una ruota dentata. — Si può ancora provare che l'altezza dei suoni cresce col numero delle vibrazioni, mediante la *ruota dentata* di Savart, contro i cui denti si fa appoggiare una carta da giuoco, mentre quella vien fatta girare sul suo asse (fig. 165).

Se si fa girare la ruota lentamente, si sentono distinti gli urti della carta contro i denti; ma se la velocità della ruota raggiunge un certo limite s'incomincia a percepire un suono grave o basso, e col crescere della velocità il suono diviene sempre più alto od acuto.

Se invece di una vi sono più ruote dentate infisse sullo stesso asse, con diversi numeri di denti, quella che ne ha un numero maggiore dà un suono più acuto.

6. Unisono. — Due suoni si dicono all'*unisono* quando hanno la stessa altezza. E siccome l'altezza dei suoni dipende dal numero delle vibrazioni eseguite nell'unità di tempo, perciò i suoni all'unisono sono costituiti da egual numero di vibrazioni compiute in egual tempo. Per es., elevando successivamente l'altezza del suono, sia della sirena, sia di una ruota dentata, col crescere la velocità di rotazione il loro suono può essere portato all'unisono di un altro qualunque.

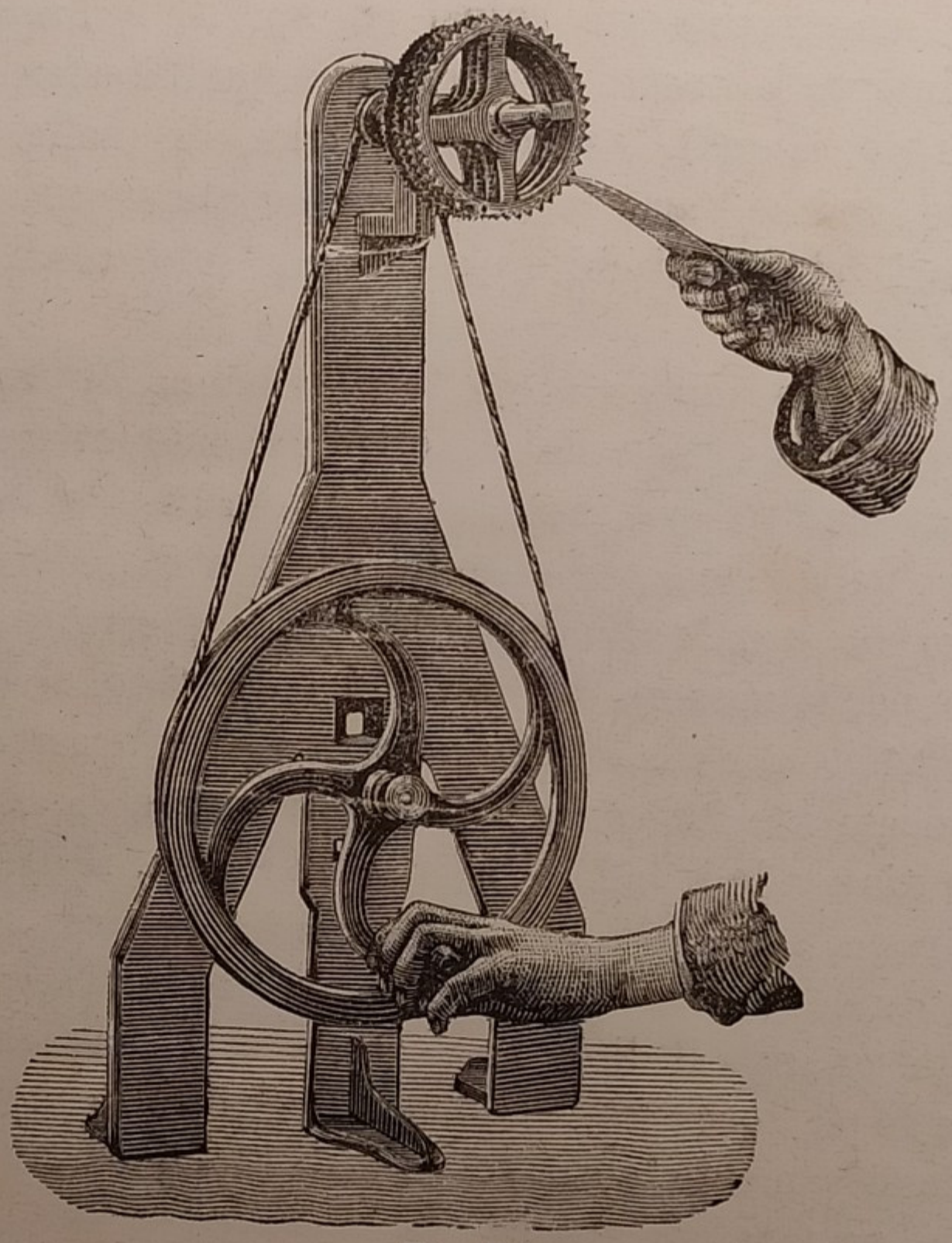


Fig. 165.

7. Misura del numero delle vibrazioni. — Il numero delle vibrazioni di un suono si può determinare in diverse maniere; per esempio colla sirena. Perciò si richiedono tre operazioni.

1° Mettere la sirena all'unisono col suono di cui si vuole conoscere il numero delle vibrazioni;

2° Determinare col contatore il numero dei giri del disco mobile in un determinato numero di secondi, durante i quali i due suoni siano sempre all'unisono;

3° Calcolare il numero totale delle vibrazioni ottenute in quel numero di secondi e dividerlo per questo numero.

Il primo risultato si ottiene regolando opportunamente la pressione del mantice con un peso sovrapposto, perchè il suono della sirena, dapprima basso, s'inacutisce lentamente, e, con un dato peso, giunge ad un massimo di altezza che non può essere oltrepassato, perchè l'aumento di velocità che la corrente d'aria tende a produrre nel disco girante è equilibrato dalle resistenze. Con alcune prove si trova il peso conveniente per detto scopo.

Il giudicare poi che due suoni sieno all'unisono richiede un orecchio esercitato. Tuttavia, tale giudizio è facilitato dal fatto che quando due suoni sono assai vicini in altezza, risultano, come si studierà più innanzi, rinforzi e diminuzioni dell'intensità del suono, che si dicono *battimenti*, il cui numero diviene sempre minore quanto minore è la differenza di altezza, e spariscono affatto quando sono all'unisono.

Quando si è ottenuto l'unisono, si osserva la posizione degli indici, e poi si mette in azione il contatore per un dato numero di secondi, per es. 10. È meglio che il numero dei secondi sia alquanto grande, perchè così i piccoli errori, inevitabili nell'operazione, si distribuiscono su di un maggior numero di vibrazioni e riescono meno sensibili. Dopo il detto numero di secondi si interrompe il movimento del contatore, e dalla posizione degli indici si vede quanti giri ha fatto il disco in quel tempo.

8. Vibrografo di Duhamel. — Più facile che colla sirena riesce la determinazione dei numeri delle vibrazioni dei suoni mediante il *vibrografo*, che è un apparecchio col quale le vibrazioni vengono segnate graficamente su di un foglio di carta.

Consiste (fig. 166) in un cilindro di metallo (C), girevole su di un asse fatto a vite (V), cosicchè mentre questo gira quello si sposta nella direzione del suo asse. Detto cilindro si ricopre di un mantello di carta, sul quale si fa depositare uno strato uniforme di nero fumo col farlo girare sopra una o più fiamme di candela. Finalmente su tale mantello si fa appoggiare delicatamente una punta alquanto pieghevole di setola, o di sottile cannello di penna, applicata con cera al corpo vibrante.

Se non è possibile applicare la punta al corpo sonoro stesso, la si può applicare ad una verghetta d'acciaio (come indica la

figura) fissa con una morsa, regolando la lunghezza di quella per modo che, messa in vibrazione, dia un suono all'unisono con quello del corpo sonoro.

Ora, quando questo non vibra, la punta descrive sul mantello del cilindro girante una linea spirale; quando invece è in vibrazione, allora la linea risulta sinuosa, e il numero della sinuosità è precisamente eguale al numero delle vibrazioni eseguite dal corpo sonoro nel tempo in cui la punta rimase in contatto col mantello.

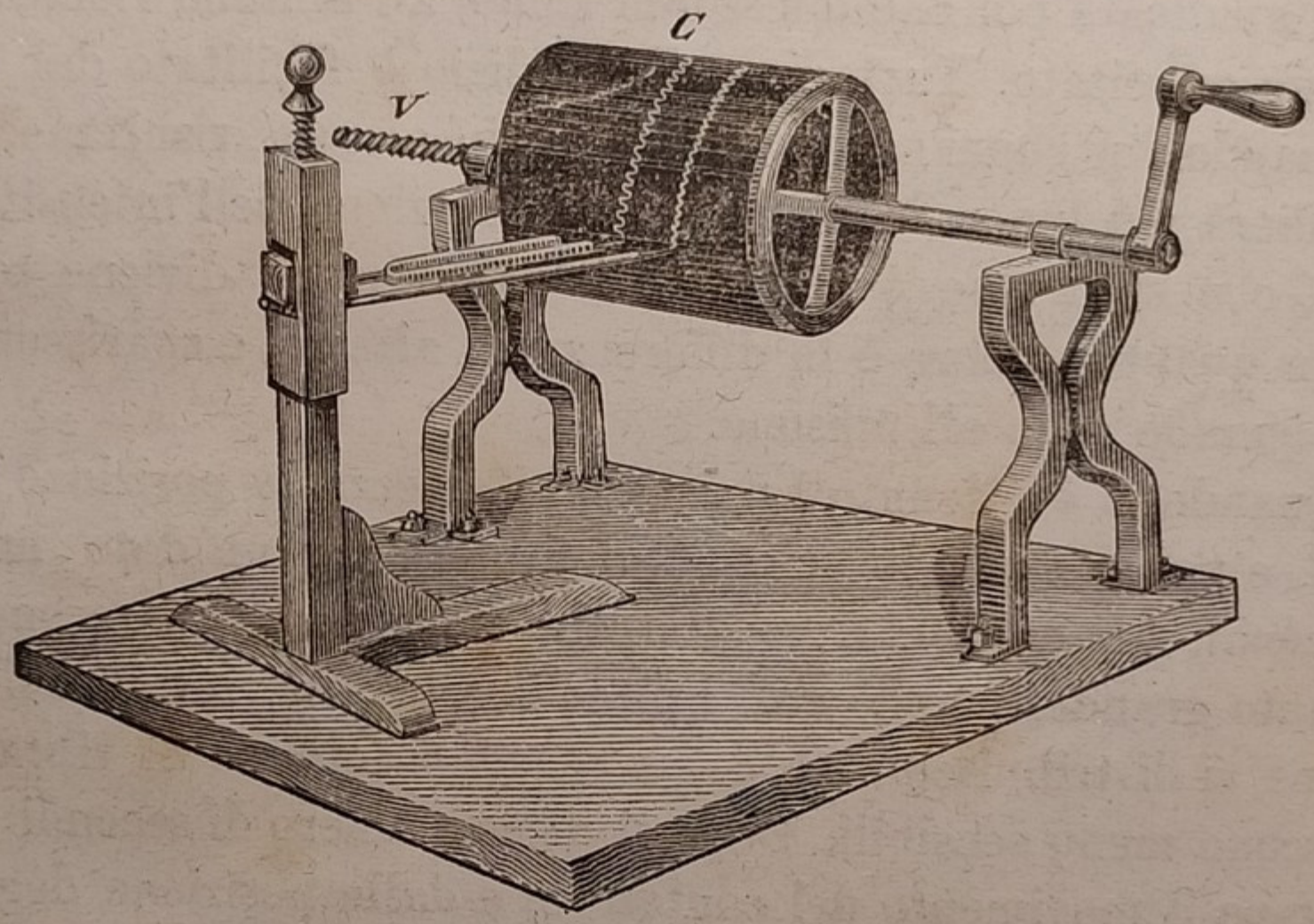


Fig. 166.

Perciò, se si nota precisamente il tempo durante il quale il corpo vibrante scrive le sue oscillazioni sul foglio di carta, e poi si contano le sinuosità segnate sul foglio, si conosce il numero delle vibrazioni fatte dal corpo sonoro in quel tempo, e quindi in 1 *s*.

Si possono poi rendere stabili i segni ottenuti togliendo il foglio dal cilindro ed immergendolo momentaneamente in una soluzione di gomma lacca nell'alcool, e poi facendolo asciugare.

Però anche il metodo grafico richiede cure speciali per evitare gli errori, perchè applicando ad uno del rebbi del diapason una punta si fa variare alquanto il numero delle sue vibrazioni, e per impedire tale alterazione bisogna convenientemente caricare anche l'altro rebbio, nonchè la parte ricurva inferiore, con pallot-

tole di cera, e occorre poi un tono di confronto ed un orecchio espertissimo per ridurre lo stromento all'intonazione di prima.

9. Limiti dei suoni percettibili dall'orecchio umano. — Perchè il nostro orecchio percepisca un suono il numero delle vibrazioni per secondo deve essere compreso fra due limiti, uno minimo, l'alto massimo, i quali però sono soggettivi, cioè possono variare da un orecchio all'altro. Perciò si possono solo stabilire i detti limiti per un orecchio normale, i quali sono di 16 a 30000 vibrazioni per secondo.

Che vi sia un limite inferiore nel numero delle vibrazioni costituenti il suono si fa manifesto colla sirena, perchè, quando nel principio il disco mobile gira lentamente si odono distinti i colpi dell'aria soffiata contro quella esterna, come pel vapore che esce dal cilindro della locomotiva, ma non si percepisce un suono per la loro riunione. Un suono gravissimo incomincia solo quando la sirena gira un po' presto.

Parimente le oscillazioni di un pendolo, perchè troppo lente, non producono suono.

Però i suoni adoperati nella musica sono compresi fra limiti molto più ristretti, cioè: fra 20 e 5000 vibrazioni per secondo, perchè oltre cotali limiti non producono sensazione gradevole.

§ 86. Scala musicale e suoni armonici.

1. Differenza fra tono e rumore. — Dicesi *tono* un suono musicale di altezza costante. Invece il *rumore* è un suono di altezza variata, o un miscuglio confuso di più toni.

Il tono nasce da vibrazioni regolari per forma e durata, mentre i rumori nascono da vibrazioni irregolari nella forma e durata. Ovvero: *il tono nasce da movimenti periodici e il rumore da movimenti non periodici.*

Il che si può dimostrare coi metodi grafici (pag. 285).

Però la distinzione fra tono e rumore non è sempre precisa. Per es., quando si lascia cadere un pezzo di legno per terra si dice che si sente un rumore anzichè un suono. Ma facendone cadere otto successivamente, di convenienti dimensioni, si sente la scala musicale: il che prova che ciascuno di quei suoni ha un valore musicale.

2. Scala musicale. — La *scala musicale*, denominata anche *gamma*, è un periodo di 7 suoni o *note* di altezza crescente, che furono adottate nella musica dai popoli più civili, siccome fondamento di tutte le combinazioni musicali. Si chiama anche *scala musicale naturale.*

I popoli latini distinguono le note colle seguenti sillabe, mentre i Tedeschi le indicano colle lettere dell'alfabeto scritte al di sotto:

ut o *do*, *re*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*
C D, E, F, G, A, H.

Gli Inglesi usano le stesse lettere colla sola differenza della lettera B invece della H.

Colle stesse lettere minuscole e con lineette collocate sopra o sotto i Tedeschi e gl'Inglesi indicano le note più alte o più basse.

3. Numeri relativi di vibrazioni delle note della gamma. — Ora i fisici avendo determinato coi metodi precedenti (p. 285) i *numeri di vibrazioni* delle diverse note della gamma, trovarono che mentre il *do* fa una vibrazione, il *re* ne fa $1 + \frac{1}{8} = \frac{9}{8}$, il *mi* ne fa $1 + \frac{1}{4} = \frac{5}{4}$, e così di seguito, siccome si vede nel seguente quadro:

do,	*re*,	*mi*,	*fa*,	*sol*,	*la*,	*si*,	*do*
1	$\frac{9}{8}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$.	

Dopo questa viene un'altra gamma più alta, i cui numeri relativi di vibrazioni sono quelli precedenti moltiplicati per 2, e a questa ne succede un'altra, i cui numeri relativi di vibrazioni sono quelli della 1ª moltiplicati per 4, e così di seguito fino al limite dei suoni percettibili.

Inversamente, si ottengono i numeri relativi di vibrazioni delle note delle gamme più gravi della prima dividendo i numeri relativi di questa per 2, 4, ecc.

4. Numeri assoluti di vibrazioni delle note della gamma. — Dai detti numeri relativi si può poi facilmente passare ai *numeri reali* od *assoluti* di vibrazioni constituenti i suoni.

Per es., se si parte dal suono del corista normale francese, che è un *la* di 870 vibrazioni semplici per secondo, si può avere dapprima il numero delle vibrazioni del *do* della gamma in cui si trova quel *la*, osservando che i numeri relativi di vibrazioni del

do e *la*

sono: 1 e $\frac{5}{3}$

e che fra il numero assoluto ignoto x di vibrazioni del *do* e il numero assoluto noto, 870, di vibrazioni del *la* vi deve essere lo stesso rapporto che vi è fra i loro numeri relativi di vibrazioni; quindi si ha la proporzione:

$$x : 870 = 1 : \frac{5}{3};$$

d'onde si ricava: $x = 870 : \frac{5}{3} = 870 \times \frac{3}{5} = 522.$

Quindi i numeri assoluti di vibrazioni semplici delle note di questa gamma sono i seguenti:

do, *re*, *mi*, *fa*, *sol*, *la*, *si*;

$522;\ 522\times\frac{9}{8};\ 522\times\frac{5}{4};\ 522\times\frac{4}{3};\ 522\times\frac{3}{2};\ 522\times\frac{5}{3};\ 522\times\frac{15}{8},$

ossia

522; 587,25; 652,50; 696; 783; 870; 978,75.

I numeri delle vibrazioni complete sarebbero metà dei precedenti.

Moltiplicando successivamente i numeri precedenti per 2, $2^2 = 4$, $2^3 = 8$, ecc., si hanno i numeri assoluti di vibrazioni delle note delle gamme successive più acute, fino al limite dei suoni acuti percettibili; mentre dividendo gli stessi numeri per le stesse potenze del 2 si hanno i numeri assoluti di vibrazioni

delle note delle gamme più gravi, fino al limite dei suoni gravi percettibili.

In generale, la prima nota o *tonica*, come la chiamano i musici, può essere una nota qualunque, ma determinate le vibrazioni di questa, son pure determinate le vibrazioni delle altre, dai numeri precedenti. Quando si suona o si solfeggia, cioè si cantano le note della gamma sulle sillabe *do*, *re*, *mi*, ecc., si può scegliere arbitrariamente l'altezza della nota con cui si incomincia, ma bisogna poi dare a tutte le altre note l'altezza indicata dai numeri relativi di vibrazioni per costituire la gamma senza stonature.

5. Intervalli. — Si dice *intervallo* di due note il rapporto fra le loro altezze, espresso per mezzo del rapporto $\frac{N}{n}$ del numero N di vibrazioni della più alta al numero n di vibrazioni della più bassa.

E siccome il detto rapporto non muta valore moltiplicando o dividendo i suoi due termini per uno stesso numero, ne consegue che l'intervallo di due note non dipende dal loro numero assoluto, ma solo dal loro numero relativo di vibrazioni.

Per es. l'intervallo fra il *sol* di $522 \times \frac{3}{2} = 783$ vibrazioni e il *do* di 522 vibr., è $\frac{sol}{do} = \frac{522 \times \frac{3}{2}}{522 \times 1} = \frac{\frac{3}{2}}{1} = \frac{3}{2}$.

6. Intervalli della gamma. — Se si cercano gli intervalli fra le note contigue della scala musicale dividendo il numero relativo di vibrazioni della nota più acuta pel numero relativo di vibrazioni della nota vicina e più grave, si ha il seguente risultato:

$\frac{re}{do_1}$	$\frac{mi}{re}$	$\frac{fa}{mi}$	$\frac{sol}{fa}$	$\frac{la}{sol}$	$\frac{si}{la}$	$\frac{do_2}{si}$
$\frac{9}{8} : 1 = \frac{9}{8}$	$\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$	$\frac{4}{3} : \frac{5}{4} = \frac{16}{15}$	$\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$	$\frac{5}{3} : \frac{3}{2} = \frac{10}{9}$	$\frac{15}{8} : \frac{5}{3} = \frac{9}{8}$	$2 : \frac{15}{8} = \frac{16}{15}$
tono >	tono >	semitono >				

$\frac{24}{25}$

L'intervallo $\frac{9}{8}$, che è il maggiore, si chiama *tono maggiore;* il secondo $\frac{10}{9}$, *tono minore;* ed il terzo $\frac{16}{15}$, che è il più piccolo, dicesi *semitono maggiore*, per distinguerlo da un altro semitono detto *minore*, rappresentato da $\frac{25}{24}$, il quale è l'intervallo fra il tono minore $\frac{10}{9}$ e il semitono maggiore $\frac{16}{15}$, e viene usato, come vedremo, nei così detti *diesis* e *bemolli*.

Infine l'intervallo tra il tono maggiore e il minore è:

$$\frac{9}{8} : \frac{10}{9} = \frac{9}{8} \times \frac{9}{10} = \frac{81}{80}.$$

Questo è il più piccolo intervallo che si considera nella musica, e richiede un orecchio assai esercitato per distinguerlo. Lo si dice *comma*.

7. **Disposizione degli intervalli nella gamma naturale.** — Indicando con T i toni maggiori e con *t* i toni minori, i detti intervalli collocati fra le rispettive note danno il seguente quadro:

Note:	do,	re,	mi,	fa,	sol,	la,	si,	do_2
N. relativi di vibraz.	1,	$\frac{9}{8}$,	$\frac{5}{4}$,	$\frac{4}{3}$,	$\frac{3}{2}$,	$\frac{5}{3}$,	$\frac{15}{8}$,	2.
Intervalli:	$\frac{9}{8}$, T,	$\frac{10}{9}$, t,	$\frac{16}{15}$, $\frac{1}{2}$ T,	$\frac{9}{8}$, T,	$\frac{10}{9}$, t,	$\frac{9}{8}$, T,	$\frac{16}{15}$, $\frac{1}{2}$ T.	

La scala musicale ordinaria, detta anche *scala naturale*, o *diatonica*, è dunque una successione di 2 toni intieri (l'uno maggiore e l'altro minore), poi un semitono maggiore, seguito da 3 toni intieri (maggiore, minore, maggiore) ed infine un semitono maggiore. Senza tale successione di intervalli risultano stonature.

8. **Intervalli fra la prima e le altre note della gamma.** — Gli intervalli fra la 2ª, 3ª, . . . 8ª nota della gamma, e la 1ª *do*, diconsi rispettivamente di *seconda, terza . . . ottava.*

9. **Intervalli di terza maggiore e minore.** — Si distinguono ancora gli intervalli:

$$\frac{\text{mi}}{\text{do}} = \frac{5}{4} : 1 = \frac{5}{4}, \text{ detto } \textit{terza maggiore};$$

$$\frac{\text{sol}}{\text{mi}} = \frac{3}{2} : \frac{5}{4} = \frac{6}{5}, \text{ detto } \textit{terza minore}.$$

Il 1° è costituito da due toni interi, uno maggiore *re-do* e uno minore *mi-re*. Il 2° è solo costituito da un tono maggiore *sol-fa* e un semitono maggiore *fa-mi;* perciò è minore del precedente, per cui, rispetto all'altro, chiamasi terza minore.

10. Suoni armonici, od ipertoni. — Nell'acustica hanno grande importanza i *suoni armonici*, od *ipertoni* (toni superiori), col quale nome si distinguono i suoni i cui numeri di vibrazioni stanno fra loro come i numeri interi consecutivi 1, 2, 3, 4, 5, 6....., perchè la maggior parte di essi combinati due a due danno accordi, od armonia, come si vedrà in seguito (§ 98).

L'importanza dei suoni armonici è dovuta al fatto che in generale i suoni non sono semplici, cioè costituiti da un solo numero di vibrazioni, ma composti, cioè risultano da un suono fondamentale, costituito da un dato numero di vibrazioni, accompagnato da altri suoni i cui numeri di vibrazioni sono precisamente doppî, tripli, ecc., di quello del suono fondamentale, ed i quali perciò sono armonici col medesimo.

§ 87. Diesis e bemolli.

1. Significato musicale dei diesis e bemolli. — I musici chiamano *diesis* una nota quando viene elevata di un semitono minore (pag. 291), e *bemolle* quando viene abbassata di un semitono minore.

2. Valore numerico dei diesis e bemolli. — Per diesare una nota, cioè per aumentare il suo numero di vibrazioni di un semitono minore, si moltiplica quel numero pel valore del semitono minore, che è $^{25}/_{24}$, ovvero si aumenta il numero delle vibrazioni di una ogni 24; e per bemollizzare una nota, od abbassarla di un semitono minore, si divide il suo numero di vibrazioni per $\frac{25}{24}$, ovvero lo si moltiplica per $\frac{24}{25}$, cioè lo si diminuisce di una vibrazione per ogni 25.

Per tal modo un tono maggiore $\frac{9}{8}$ bemolizzato si riduce a $\frac{9}{8} \times \frac{24}{25} = \frac{27}{25} = \frac{16}{15} \times \frac{81}{80}$; e un tono minore $\frac{10}{9}$ diviene: $\frac{10}{9} \times \frac{24}{25} = \frac{16}{15}$, cioè tutti e due divengono eguali a un semitono maggiore colla differenza di una comma (pag. 291), che è trascurabile.

E un semitono maggiore $\frac{16}{15}$ diesato diviene: $\frac{16}{15} \times \frac{25}{24} = \frac{10}{9}$, cioè eguale ad un tono minore, che, come si sa, differisce dal maggiore solo di una comma.

3. Uso dei diesis. — Per intendere l'*uso dei diesis* devesi osservare che la scala naturale, o gamma, è la successione di due toni, un semitono, tre toni e un semitono (pag. 291), cioè trascurando la differenza tra i toni maggiori e minori, e rappresentando, per brevità, con t il tono, e $^1/_2$ t il semitono, nella scala naturale si hanno le seguenti serie di

note: do, re, mi, fa, sol, la, si, do,
e intervalli: t, t, $^1/_2$ t, t, t, t, $^1/_2$ t.

Ora, una scala, cioè la successione di due toni, un semitono, tre toni e un semitono, si può incominciare da qualunque nota. Ma se si incomincia per es. dal *sol* della scala naturale, si avrebbero le seguenti serie di

note: sol, la, si, do, re, mi, fa, sol,
e intervalli: t, t, $^1/_2$ t, t, t, $^1/_2$ t, t,

cioè il 1° semitono è dalla 3ª *si* alla 4ª *do*, come deve essere nella scala naturale, ma il 2° semitono è fuori posto, perchè viene a trovarsi fra la 6ª *mi* e la 7ª *fa*, mentre che deve essere fra la 7ª *fa* e l'8ª *sol*. Per trasportare questo 2° semitono dalla 7ª all'8ª, si innalza il *fa* naturale di un semitono, cioè lo si eleva a *diesis*, permodochè vi resta poi un tono dal *mi* al *fa diesis* e un semitono dal *fa diesis* al *sol*, come dev'essere nella scala naturale.

Si esprime tale innalzamento di un semitono fatto ad una nota col segno ♯ che si segna a sinistra di quello della nota nella scrittura musicale, mentre nei libri di acustica tale segno si colloca a destra della sillaba che rappresenta la nota.

Perciò la detta scala di *sol* diviene:

note sol, la, si, do, re, mi, fa♯, sol,
e intervalli: t, t, $^1/_2$ t, t, t, t, $^1/_2$ t.

Dunque la scala di *sol* ha un diesis in chiave per la nota *fa*.

Il che si può illustrare sperimentalmente facendo la scala di *sol* su un pianoforte, oppure su di un'armonica a lastre di vetro o di acciaio, con almeno due ottave.

Parimenti si verifica facilmente che per fare la scala di *mi* si debbono diesare le 4 note *sol*, *fa*, *do*, *re* per non stonare.

4. Uso dei bemolli. — Se si fanno le note naturali cominciando dal *fa*, si ottiene la serie:

fa, sol, la, si, do, re, mi, fa,
t, t, t. $^1/_2$ t, t, t, $^1/_2$ t.

Si ha cioè il 1° semitono fra il *si* e il *do*, ossia fra la 4ª e la 5ª, invece di averlo fra la 3ª e la 4ª; mentre il 2° semitono è a posto, cioè fra la 7ª *mi* e l'8ª *fa*. Ma basta abbassare il *si* di un semitono per avere la scala giusta. La nota *si* così abbassata di un semitono si indica col segno, *b*, che, come quello del *diesis*, si scrive a sinistra del segno della nota nella musica, e a destra nell'acustica, a guisa di esponente, cioè si scrive $si^{\flat}$.

La scala naturale di *fa* è pertanto:

fa, sol, la, $si^{\flat}$, do, re, mi fa,
t, t, $^1/_2$ t, t, t, t, $^1/_2$ t.

Ossia la scala di *fa* ha un bemolle in chiave pel *si*.

5. Funzione dei diesis e bemolli nella musica. — Dunque per mezzo dei *diesis* e *bemolli* i musici possono incominciare le scale da una nota qualunque, e così trasportare una melodia verso l'acuto o verso il grave, cioè riprodurla cogli stessi intervalli, il che occorre frequentemente.

§ 88. Scala naturale e temperata.

1. Scala naturale. — La scala costituita nel modo anzidetto (pag. 291), cioè dalla successione di due toni (uno maggiore, l'altro minore), un semitono, tre toni (maggiore, minore, maggiore) e un semitono, dicesi *scala naturale*, ed è quella più perfetta per gli orecchi musicali. Essa venne costituita dai musici ad orecchio, e dipende dalla organizzazione di questo.

Tale scala si può eseguire negli stromenti a note non fatte, come gli stromenti a corde, di cui si fa variare la lunghezza mediante il contatto delle dita (contrabasso, violoncello, viola, violino), come pure negli stromenti a fiato, nei quali si fa variare l'altezza delle note col variare l'energia del soffio.

2. Scala temperata. — Gli stromenti a note fatte, come il pianoforte, le armoniche, ecc., per dare le note esatte della scala naturale, dovrebbero avere 52 note per ogni ottava, il che li renderebbe troppo complicati. Perciò in essi si segue un'altra scala detta *temperata*, nella quale l'intervallo di ottava è diviso in dodici intervalli tutti eguali.

3. Necessità della scala temperata negli stromenti a note fatte. — Per intendere la necessità della scala temperata basta fare la seguente osservazione.

Il numero relativo delle vibrazioni del *do* essendo 1, quello del *do diesis* è $1 \times \frac{25}{24} = \frac{25}{24}$. Ora il numero delle vibrazioni del *re* è $\frac{9}{8}$; quindi quello del

re bemolle è $\frac{9}{8}\times\frac{24}{25}=\frac{27}{25}$; cioè il numero relativo delle vibrazioni del *re bemolle* non coincide con quello del *do diesis*. Così pure il *re* ♯ non coincide col *mi* ♭, ecc.

Perciò negli stromenti a note non fatte, come quelli ad arco, il suonatore perfetto cava il do ♯ in modo diverso dal re ♭, e così per le altre note. Ma negli stromenti a note fatte, per distinguere una nota diesis dalla seguente bemollizzata si richiederebbero dapprima per ciascuna scala le 7 note fondamentali, le stesse 7 note diesate, e le stesse 7 bemollizzate, in tutto 21 note diverse, e poi, per poter cominciare la scala da una nota diesis o bemolle bisognerebbe anche usare i doppi diesis e i doppi bemolli; e così per ogni scala si dovrebbero avere le 7 note naturali, 7 note diesis e 7 note bemolli, 7 doppi diesis e 7 doppi bemolli, in tutto $7\times5=35$ note. E per distinguere poi ancora il tono intero maggiore $\frac{9}{8}$ dal tono intero minore $\frac{10}{9}$ e così pure il semitono maggiore $\frac{16}{15}$ dal minore $\frac{25}{24}$, si richiederebbero nientemeno che 52 note per ciascuna ottava, il che porterebbe una complicazione tale da renderne quasi impossibile l'uso.

Per es. il pianoforte, che nella forma attuale ha 7 ottave con 12 note per ottava, e quindi $12\times7=84$ note (più una), se dovesse avere 52 note per ottava, acquisterebbe $52\times7=364$ note (più una), e la sua lunghezza, che attualmente è poco superiore ad 1 metro, diverrebbe da 5 a 6 metri.

Per evitare cotesto inconveniente si riuniscono in una sola le note *do* ♯ e *re* ♭, *re* ♯ e *mi* ♭, ecc., vale a dire: fra ciascuno dei 5 toni interi della scala naturale si inserisce un semitono, che si considera ad un tempo come il diesis della nota bassa e il bemolle della successiva più alta. Così si viene a dividere l'intervallo di ottava, fra $do_1=1$ e $do_2=2$, in $5\times2+2=12$ semitoni, che si fanno tutti uguali fra loro.

4. Valore dell'intervallo costante fra le note della scala temperata. — Siccome il numero relativo delle vibrazioni di una nota si ottiene moltiplicando quello della nota precedente per il loro intervallo, così se fra i numeri relativi di vibrazioni 1 e 2 si vogliono avere 12 semitoni tutti eguali, rappresentando con x l'intervallo fra l'uno e l'altro, risulta la seguente serie di note:

do ♯ = re ♭		re ♯ = mi ♭			fa ♯ = sol ♭		sol ♯ = la ♭		la ♯ = si ♭		
do_1	re		mi	fa		sol		la		si	$do_2=2$
1	x^1	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	x^7	x^8	x^9	x^{10}	x^{11}	$x^{12}=2.$

Ora dall'eguaglianza $x^{12}=2$, si ricava $x=\sqrt[12]{2}=1{,}05946$, che è il valore numerico dell'intervallo costante che vi è fra le note della scala temperata, nella quale risultano alterati tutti gli intervalli meno quello di ottava, perchè solo le note estreme della scala temperata coincidono con quelle della scala naturale.

Pertanto nella scala temperata non si fa distinzione tra il tono intero maggiore e il tono intero minore; si identifica il semitono maggiore col minore, e si considerano come toni eguali il *diesis* di una nota e il *bemolle* della successiva. Così tutti i suoni dell'ottava si riducono a 12 soli, equidistanti fra loro. Su tale principio sono fondati gli stromenti musicali a note fatte, come i pianoforti, gli armonium, gli organi, ecc., nei quali con 7 tasti bianchi e 5 neri si provvede a tutti i suoni compresi in un'ottava.

5. Disposizione delle note nel pianoforte. — Perciò nel pianoforte fra le note *do* e *re*, *re* e *mi*, date dai tasti bianchi, vi sono superiormente due semitoni dati da tasti neri; poi fra *mi* e *fa* non vi è alcun tasto nero, non occorrendo inserire un semitono che vi è già fra tali note nella scala naturale. Vi sono poi nuovamente tre tasti neri, che danno i tre semitoni inseriti tra *fa* e *sol*, *sol* e *la*, *la* e *si*, mentre fra *si* e *do* non vi è più alcun tasto nero, essendovi già naturalmente un semitono.

Lo stesso dicasi per l'armonica a lastre di vetro, o di acciaio, coi semitoni.

6. Pregi e difetti della scala temperata. — Il temperamento della scala musicale mentre presenta il vantaggio di permettere, col minor numero possibile di note, il massimo numero possibile di scale, con sensibilmente eguale melodia, trae seco l'inconveniente che nessun accordo degli stromenti a scala temperata, come ad es. del pianoforte, è perfettamente puro. Ma siccome la composizione musicale ha il suo fondamento nel pianoforte, così la scala temperata è quella generalmente seguìta dai cantanti e dagli istromentisti. Solo i concertisti, i quali si emancipano completamente dalle regole della scuola, ed hanno un assai fino orecchio, come pure i suonatori di quartetto ad arco, senza accompagnamento di pianoforte, ritrovano da sè stessi la melodia della scala naturale, e raggiungono così il massimo effetto.

Ma quando uno strumento a note libere, o un cantante, accompagna il pianoforte o altro stromento a note fatte è obbligato a temperare, cioè a seguire la scala temperata di questo.

Tuttavia le differenze fra le note delle due scale sono abbastanza piccole per potersi trascurare. Perciò la gamma temperata può essere impiegata senza stonatura sensibile. Del resto l'abitudine del pianoforte ha disavvezzato il maggior numero degli orecchi dalla percezione degli intervalli esatti.

§ 89. Interferenza delle onde.

1. Interferenza delle onde sull'acqua. — Che cosa avviene quando le onde acquee partite da un punto incontrano quelle partite da un altro punto? Anche senza avere fatto esperimenti in proposito, ognuno intende che se due sollevamenti o due de-

pressioni si sovrappongono, si sommano e nasce un sollevamento o una depressione maggiore; se invece un sollevamento si sovrappone ad una depressione si differenziano, e se sono eguali si annullano.

E più generalmente ognuno intende che quando due movimenti ondulatorii, che si propagano in un mezzo elastico, s'incontrano, ove gli spostamenti portati dalle onde hanno la stessa direzione, si sommano, e nasce uno spostamento maggiore; invece ove gli spostamenti portati dalle onde sono contrarii, si differenziano, e nasce uno spostamento minore il quale è nullo quando gli spostamenti che arrivano contemporaneamente sono eguali e contrarii.

Questo fenomeno importante della sovrapposizione di due o più movimenti ondulatorii che arrivano contemporaneamente nello stesso punto del mezzo in cui si propagano dicesi *interferenza delle onde*.

2. Interferenza delle onde in una fune. — Il fenomeno dell'interferenza dei moti ondulatorii si può rendere manifesto in una scuola mediante una fune o un tubo di gomma attaccato per un suo capo al soffitto. Come venne già esposto (pag. 261), se al capo inferiore della fune, e del tubo di gomma, si fa eseguire un'oscillazione pendolare, nasce, nella fune o nel tubo, un'onda, la quale si propaga nel medesimo fino al capo fisso, ove giunta ritorna indietro, cioè si riflette. Ora, se mentre l'onda riflessa ritorna indietro si generano regolarmente altre onde dirette che incontrano quelle riflesse si vede il tubo dividersi in un certo numero di parti aliquote, separate da sezioni di riposo, mentre ad eguale distanza da queste è massima l'ampiezza della oscillazione.

I luoghi in cui lo spostamento è minimo, o anche nullo, diconsi *nodi*, o *sezioni nodali*; le parti comprese fra due nodi successivi diconsi *internodi* o *concamerazioni*; infine i luoghi in cui lo spostamento è massimo, chiamansi *ventri*, o *sezioni ventrali*.

Facendo oscillare opportunamente un capo del tubo si può avere un punto fisso o *nodo* in mezzo e due *ventri* nelle due metà; ovvero due nodi fra i due capi e tre *ventri* in mezzo ad essi, ecc.

Il fenomeno della divisione del tubo di gomma in parti aliquote separate da nodi si manifesta anche bene tenendolo più o meno teso, e dando con una riga o un bastone dei colpi ritmici o periodici, cioè in eguali periodi di tempo, verso il capo che si tiene in mano.

Col variare della tensione varia la velocità della propagazione del moto ondulatorio, come pure la lunghezza delle onde, e quindi il numero dei nodi e ventri che nascono nel tubo.

I nodi corrispondono ai punti in cui le onde, che regolarmente si succedono, portano contemporaneamente spostamenti eguali e di contrario senso, i quali si annullano ; perciò tali punti rimangono in riposo, mentre i ventri corrispondono ai luoghi in cui le onde portano contemporaneamente spostamenti nello stesso senso, i quali si sommano e danno origine ad uno spostamento massimo.

3. Nodi e ventri in un filo teso attaccato ad un corista vibrante. — Lo stesso fenomeno si osserva fissando ad uno dei rebbi di un corista un capo di un filo bianco, che poi si tende convenientemente all'altro capo, con una morsa o con un peso, nel qual caso si fa passare il filo su di una carrucola o su di una verga. Indi si fa vibrare il corista, e quando la lunghezza e la tensione del filo sono convenienti, si vede questo dividersi in parti aliquote, separate da nodi, il cui numero dipende dalle dimensioni e tensione del filo, e dal numero delle vibrazioni del corista, come vedremo nello studio delle vibrazioni delle corde.

Per rendere il fenomeno meglio visibile conviene osservare il filo bianco su un fondo nero.

4. Onde progressive e stazionarie. — Tali movimenti ondulatorii, nei quali tutte le particelle si spostano assieme da una parte e dall'altra della loro posizione d'equilibrio, danno luogo alle *onde* dette *stazionarie*, per distinguerle dalle *onde progressive*, nelle quali ogni successiva particella comincia il suo movimento più tardi della precedente. Mentre in queste le singole particelle del mezzo oscillano successivamente, per modo che quella che segue incomincia e finisce la sua oscillazione dopo quella che precede, nelle onde stazionarie le singole particelle oscillano contemporaneamente, ma con diversa ampiezza.

Dunque, due sistemi di *onde progressive* che si incontrano si compongono in un sistema di *onde stazionarie*, nelle quali le particelle oscillano contemporaneamente, cioè passano contemporaneamente per le loro posizioni di riposo, e contemporanea-

mente se ne allontanano. Ma gli spostamenti delle particelle di due semionde successive si compiono contemporaneamente in senso contrario.

5. Interferenza delle onde sonore. — I fenomeni esposti avvengono anche per le onde longitudinali, come sono le onde sonore nelle quali le particelle non si spostano trasversalmente alla propagazione del movimento, ma nel senso di questa.

E siccome le particelle si muovono contemporaneamente sempre in contrario senso da una parte e dall'altra del nodo che separa due semionde successive, perciò esse, ora vanno ambedue verso il nodo, ora ambedue se ne allontanano. Quindi nei nodi avvengono alternativamente condensazioni e rarefazioni; mentre nei ventri non avvengono variazioni di densità, ovvero in minor grado degli altri punti.

Dei quali fatti si vedranno in seguito le prove sperimentali.

6. Effetto dell'interferenza delle onde nei corpi sonori. — L'interferenza delle onde ha luogo in generale nei corpi sonori. Il moto vibratorio, eccitato in uno o più punti dei medesimi, genera in essi onde progressive, le quali si propagano fino ai confini, ove giunte si riflettono, e interferiscono colle nuove onde dirette; cosicchè in generale i corpi sonori non vibrano intieri, ma si dividono spontaneamente in un certo numero di parti aliquote separate da nodi o linee nodali, e le quali vibrano contemporaneamente in senso contrario.

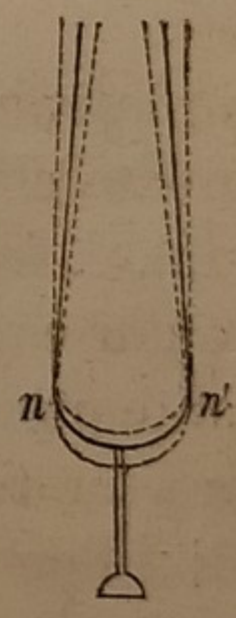


Fig. 167.

Per es., nei coristi nascono per interferenza due nodi, n, n' (fig. 167) alla estremità inferiore dei due rebbi, e tre ventri, due dei quali sono all'estremità superiore dei due rebbi, ed uno nella parte ricurva mediana, motivo per cui questa parte vibra sollevandosi ed abbassandosi; tale movimento si comunica al gambo, e perciò un corista munito di un piede per poter stare ritto su di una tavola, mentre risuona, salterella su questa.

Parimente fissando una lastra quadrata, di metallo o di vetro, nel suo centro di figura, e poi strofinando l'orlo con un archetto, nascono nella medesima per interferenza linee nodali, le quali si manifestano cospargendola di sabbia.

Così pure ogni campana scossa non vibra intiera, ma si divide almeno in 4 parti eguali corrispondenti a 2 diametri perpendicolari, le quali vibrano contemporaneamente in senso contrario, il che si può facilmente provare mediante una o più palline d'avorio poste in contatto coi nodi e ventri.

Parimente se si strofina con un archetto l'orlo di un bicchiere a calice, pieno d'acqua, si vede la superficie del liquido incresparsi, e spruzzare in corrispondenza di 4 o più ventri, compresi fra 4 o più nodi.

Sostituendo all'acqua dell'alcool si veggono comparire sulla superficie del liquido goccioline sferiche che si dispongono in graziose forme stellari coi raggi diretti verso i nodi.

7. Distanze fra i nodi e i ventri. — *La distanza tra due nodi successivi è eguale a* $^1/_2$ *della lunghezza dell'onda.* Infatti, supponiamo che un tubo di gomma elastica, fisso ai due capi A e C (fig. 168), si faccia oscillare in modo da assumere

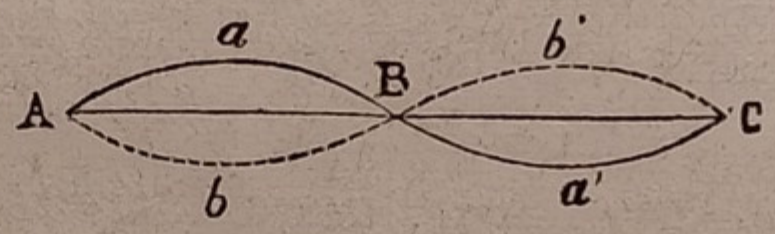


Fig. 168.

alternativamente le posizioni A *a* B *a'* C e A *b* B *b'* C. Allora è evidente che la distanza A C è uguale all'intera lunghezza dell'onda A *a* B *a'* C, o A *b* B *b'* C, e che le distanze A B e B C, le quali comprendono una sola delle due sinuosità che in ogni istante presenta l'onda, sono eguali a $^1/_2$ della lunghezza di questa. Ora i punti A, B e C, i quali stanno fermi, sono manifestamente nodi; d'onde concludesi che la distanza fra due nodi vicini, come A e B, B e C, è uguale a $^1/_2$ della lunghezza dell'onda.

Consegue:

1° *La distanza fra due ventri successivi è pure uguale a* $^1/_2$ *della lunghezza dell'onda.* Infatti, la distanza fra due ventri vicini è uguale a quella di due nodi vicini.

2° *La distanza fra un ventre ed il nodo vicino è uguale a* $^1/_4$ *della lunghezza dell'onda*, perchè i ventri corrispondono ai punti di mezzo degli internodi, cioè delle distanze fra due nodi successivi.

§ 90. Vibrazioni trasversali delle corde.

1. Corpi sonori. — Si usano come corpi sonori quelli elastici, i quali sono più capaci di acquistare il moto vibratorio. I corpi liquidi non servono come corpi sonori perchè essi non reggono alla trazione, e per la pressione provano solo piccolissime variazioni di densità; però si possono ottenere suoni anche dai liquidi eccitandoli opportunamente; per es., la sirena può dar suono anche nell'acqua, d'onde appunto il suo nome.

Per produrre suoni si usano pertanto solo i corpi solidi e gli aeriformi, e precisamente quelli che hanno una o due dimensioni assai piccole in confronto della 3ª, come le colonne aeree dei tubi sonori, le verghe, le corde, le piastre, le membrane, le campane, ecc., perchè essi riescono più pieghevoli, e quindi entrano più facilmente in vibrazione che i corpi estesi secondo le tre dimensioni.

Quindi i corpi sonori si possono distinguere in *lineari* e *superficiali*, e in *rigidi* e *pieghevoli*. Corpi sonori *lineari pieghevoli* sono le corde; *lineari rigidi* le verghe, e come tali si possono pure considerare le colonne aeree dei tubi sonori. Corpi sonori *superficiali pieghevoli* sono le membrane, per es., dei tamburi; *superficiali rigidi* sono le lastre vibranti di metallo, vetro, legno, ecc.

2. Vibrazioni trasversali e longitudinali. — Questi corpi sonori possono vibrare: o *trasversalmente* alla loro lunghezza o superficie, ovvero *longitudinalmente*, cioè nella direzione della lunghezza o superficie. Vibrano trasversalmente le corde, le verghe, le lastre, ecc., strofinate, o scosse in direzione perpendicolare alla loro lunghezza o superficie; vibrano longitudinalmente le corde, le verghe, le pareti dei bicchieri, ecc., quando si strofinano in direzione parallela alla lunghezza o superficie.

3. Corde sonore. — Le corde sonore sono fili di metallo o di minugia (budello), i quali vengono tesi fissandoli ad una estremità ed avvolgendoli attorno ad un cilindro, o biscaro, all'altra estremità, come negli stromenti musicali a corda, ovvero anche facendoli stirare da pesi. In questo caso la grandezza del peso esprime la grandezza della tensione.

Le corde, una volta tese, vengono fatte vibrare trasversalmente alla loro lunghezza, o pizzicandole colle dita, o strofinandole con un archetto, od anche battendole con un martellino di legno guernito di pelle (tasto).

4. Formola che esprime il numero delle vibrazioni trasversali di una corda. — Rappresentando con

n il numero assoluto delle vibrazioni doppie di una corda per secondo,
l la lunghezza,
r il raggio (poichè la si può considerare come un cilindro),
p il peso specifico,
P la tensione o il peso che la tende,
π il rapporto della circonferenza al diametro,
g l'accelerazione della gravità,

il numero n delle vibrazioni trasversali di una corda è espresso dalla formola:

$$n = \frac{1}{2rl}\sqrt{\frac{g\,\mathrm{P}}{\pi\,p}}.$$

5. Leggi delle vibrazioni trasversali delle corde. — La precedente formola esprime le seguenti leggi: *il numero delle vibrazioni trasversali di una corda è in ragione inversa della sua lunghezza, del suo diametro e della radice quadrata del suo peso specifico, ed è in ragione diretta della radice quadrata della sua tensione.*

Notisi però che la formola e quindi le leggi suppongono le corde perfettamente flessibili; ma queste per la loro rigidezza, la quale cresce coll'elasticità e con la grossezza, possono presentare piccole deviazioni dalla enunciata legge.

6. Sonometro. — Per studiare le vibrazioni delle corde si usa uno stromento detto *monocordo*, o *sonometro* (fig. 169). Esso consiste in una cassa rettangolare a pareti sottili di legno d'abete, su cui si possono tendere le corde mediante cavicchi, o pesi, e ponticelli collocati alle estremità. Un cavalletto mobile (c) serve a limitare la lunghezza delle parti vibranti, e questa lunghezza si può leggere su di una scala divisa in millimetri segnata sulla cassa tra i due ponticelli estremi.

Con questo stromento si verificano le leggi delle vibrazioni trasversali delle corde nella seguente maniera.

7. **Legge delle lunghezze.** — *Il numero delle vibrazioni di una corda è in ragione inversa della sua lunghezza.*

Infàtti, se si fa vibrare una corda del sonometro tutta intiera, essa rende un certo suono che dipende dalla sua lunghezza, dal suo raggio, dalla sua tensione e densità. E siccome una scala si può cominciare da qualunque nota (pag. 290), perciò si può prendere quel suono come fondamentale di una scala. Ora per avere le note seguenti della gamma, bisogna appunto, spostando il ca-

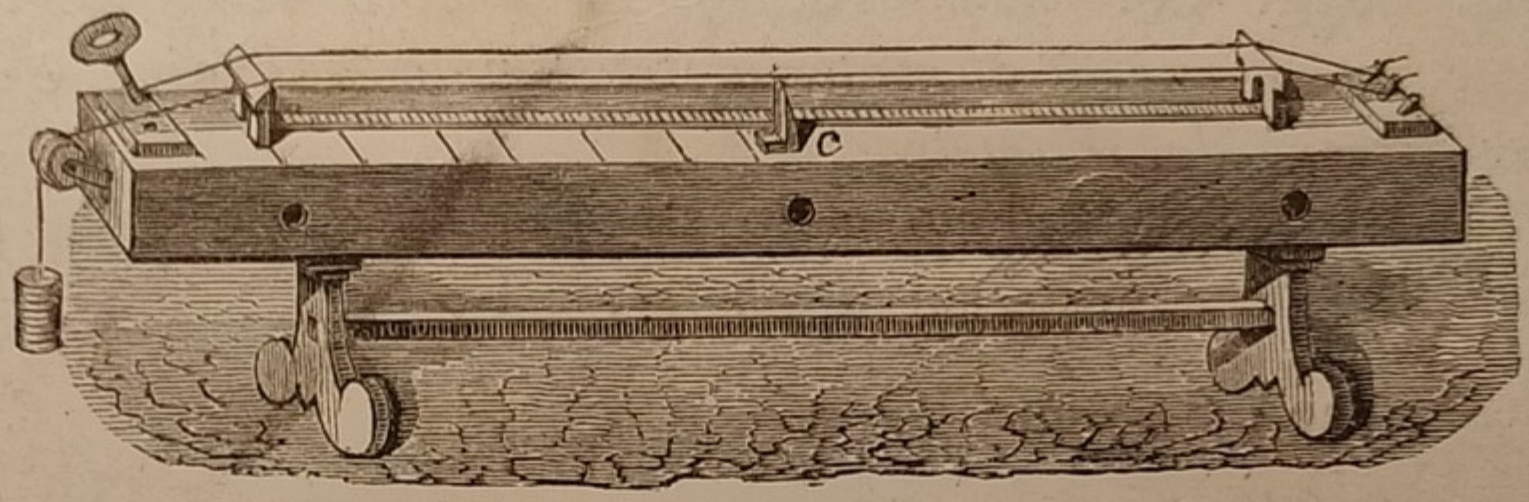


Fig. 169.

valletto mobile, far vibrare frazioni della lunghezza della corda espresse dai valori reciproci dei numeri relativi di vibrazioni delle diverse note della scala; cioè per avere le note:

do, re, mi, fa, sol, la, si, do_2

i cui numeri relativi di vibrazioni sono:

$$1, \frac{9}{8}, \frac{5}{4}, \frac{4}{3}, \frac{3}{2}, \frac{5}{3}, \frac{15}{8} \quad 2,$$

bisogna far vibrare frazioni della lunghezza della corda espresse dai numeri:

$$1, \frac{8}{9}, \frac{4}{5}, \frac{3}{4}, \frac{2}{3}, \frac{3}{5}, \frac{8}{15}, \frac{1}{2}.$$

8. **Applicazione della legge delle lunghezze negli stromenti a corda.** — Gli stromenti musicali a corda possono essere divisi in tre classi, secondo che il suono viene prodotto col fregamento dell'archetto (*), col pizzico delle dita, o col tasto.

(*) I crini della coda di cavallo, con cui sono costituiti gli archetti, sono dentati, perciò ritengono la polvere di colofonia, la quale per la sua aderenza alle corde le fa vibrare.

Alla prima classe (stromenti a fregamento) appartengono il violino, la viola, il violoncello, il contrabasso o violone; alla seconda classe (stromenti a pizzico), l'arpa, la chitarra, la lira, il mandolino; alla terza classe (stromenti a tasto), il pianoforte, il clavicembalo, la spinetta.

Ora, nelle due prime classi di stromenti si fa variare la lunghezza della parte vibrante della corda toccandola opportunamente colle dita, e si ottiene così da un piccolo numero di corde una infinità di suoni. Negli stromenti a tasto si ottengono i suoni più acuti da corde più corte.

9. Legge del diametro. — *Il numero delle vibrazioni delle corde, a parità di materia, tensione e lunghezza, è in ragione inversa del diametro.*

Infatti, se si tendono collo stesso peso corde della stessa lunghezza e sostanza, coi *diametri:* 1 , 2 , 3 ,

si ottengono note i cui

numeri relativi di vibrazioni sono: $1\ ,\ \frac{1}{2},\ \frac{1}{3},$

Si applica la legge dei diametri, tanto negli stromenti a corde di lunghezza variabile, quanto in quelli a corde di lunghezza costante, ricavando i suoni più acuti dalle corde più sottili.

10. Legge della tensione. — *Il numero delle vibrazioni delle corde, a parità di materia, lunghezza e diametro, è direttamente proporzionale alla radice quadrata della tensione.*

Infatti, se si tendono due corde eguali coi *pesi* 1 e 4,
i loro numeri di vibrazioni stanno fra loro come 1 e 2.

I suonatori ricavano da una stessa corda suoni più o meno acuti col tenderla più o meno, e così appunto si accordano gli strumenti musicali a corde. Per es. nel violino si tende la 2ª corda (cominciando dalla più sottile, detta *cantino*) in modo che dia il la_3.

11. Legge del peso specifico. — *Il numero delle vibrazioni delle corde, di eguale lunghezza, diametro e tensione, è in ragione inversa della radice quadrata del loro peso specifico.*

Tendendo egualmente due corde di pari lunghezza e diametro, l'una di minugia e l'altra di ottone, avente un peso specifico

maggiore, si trova che la seconda dà un suono più grave che la prima. Per es., se

i *pesi specifici* di due corde sono:	1	e	9,
i *loro numeri relativi di vibrazioni* stanno come:	1	e	$\frac{1}{3}$,
ovvero come	3	:	1.

Si applica pure codesta legge negli stromenti a corde ricavando i suoni più gravi da quelle di metallo anzichè di minugia, ovvero da corde di minugia rivestite di filo metallico, che aumenta la densità complessiva della massa vibrante.

12. Nodi e ventri delle corde vibranti. — *Come negli altri corpi sonori, così pure nelle corde vibranti esistono dei punti fissi o nodi, e dei punti di massima ampiezza di vibrazione o ventri.*

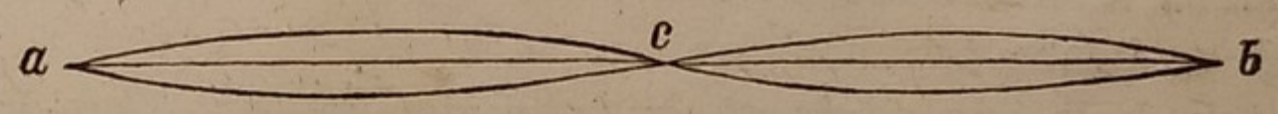


Fig. 170.

Essi nascono dall'interferenza delle onde dirette colle riflesse (pag. 297).

Se la corda vibra intera, esistono due nodi, uno a ciascuna estremità, ed un ventre in mezzo.

Il che si dimostra ponendo sulla medesima tre cavalieri di carta, uno in mezzo e due alle estremità; quando essa viene scossa o strofinata leggermente, quello di mezzo è sbalzato, mentre gli estremi rimangono.

In questo caso la corda dà il suono fondamentale corrispondente alla sua lunghezza, diametro, tensione, peso specifico.

Se poi si dispone un cavalletto mobile nel punto di mezzo (*c*, fig. 170) della corda, o la si preme ivi leggermente col dito, mentre si eccita coll'archetto una delle metà della corda, si produce nel punto medio un nodo, e non solo la metà della corda che viene scossa, ma anche l'altra metà vibra con nodi alla estremità ed un ventre in mezzo, cosicchè la corda presenta in tutto tre nodi (in *a*, *c*, *b*) e due ventri frammezzo; il che si può pure accertare mediante i cavalieri di carta.

In tal caso, secondo la legge delle lunghezze, la corda dà il primo armonico 2, cioè l'ottava acuta del suono fondamentale.

Collocando il cavalletto mobile [in *c*, fig. 171 (1)] ad un terzo della corda e scuotendo questo terzo (*a c*), gli altri due (*c b*) si dividono pure in due parti eguali (*c d*, *d b*) vibranti separatamente; cioè si produce un nodo nel punto di mezzo (*d*) dei $^2/_3$ della corda, e due ventri fra questo nodo e i due estremi (*c*, *b*). In tutto, adunque, si producono nella corda 4 nodi e 3 ventri.

Infatti, i cavalieri di carta collocati nei nodi stanno in quiete, mentre quelli collocati nei ventri salterellano o sono sbalzati dalla corda.

In tal caso, secondo la legge delle lunghezze (pag. 303), la corda dà il suono armonico 3.

Analogamente avviene se il cavalletto mobile è a $^1/_4$ della corda [in *c* fig. 171 (2)]; i rimanenti $^3/_4$ si dividono in 3 parti eguali vibranti separatamente; in questo caso la corda dà l'armonico 4.

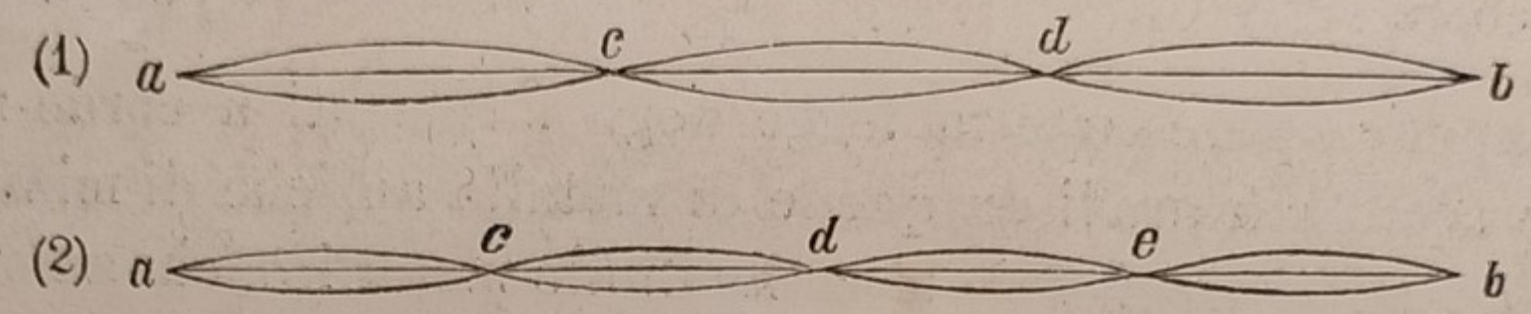


Fig. 171.

Anzi, per determinare i nodi e ventri non è neppur necessario il cavalletto sotto la corda, ma basta toccarla leggermente in uno dei detti punti col dito, ovvero con una barba di penna (fig. 172), ovvero con un pennello; i toni armonici allora riescono assai dolci e puri, simili a quelli del flautino; perciò si dicono appunto *flautini*.

Di più, non solo una corda dà gli armonici del suo tono fondamentale quando viene opportunatamente toccata in qualche punto, ma anche quando vibra intera, un orecchio esercitato sente, oltre il suo tono fondamentale

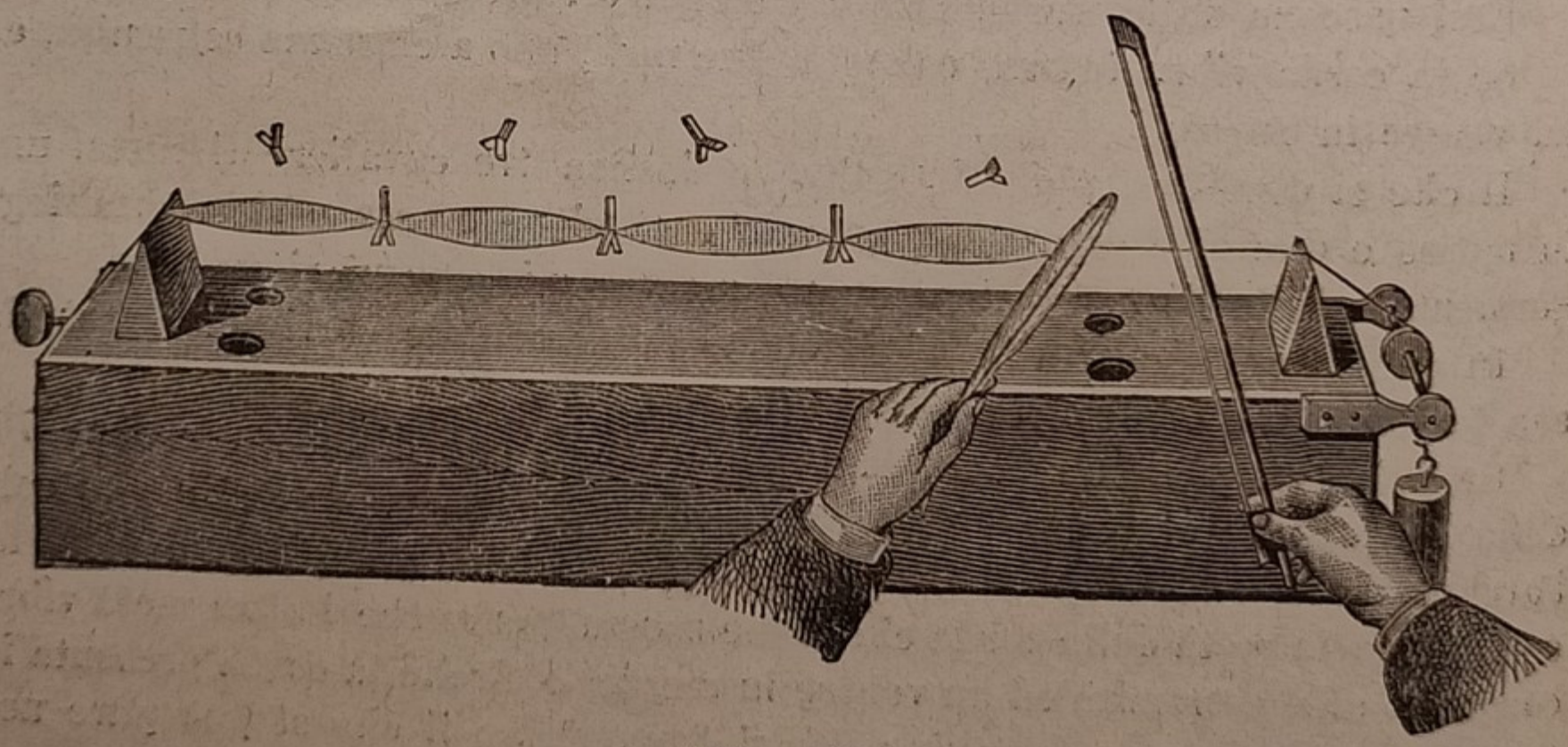


Fig. 172.

un certo numero di armonici superiori 2, 3, 4, 5, ecc., i quali provano che mentre la corda vibra intiera vibrano pure le sue parti aliquote $^1/_2$, $^1/_3$, $^1/_4$, ecc.

Il che si può anche provare mettendo in vibrazione la corda intera, e poi toccandola con una barba di penna, nel suo punto di mezzo; allora si spegne il tono fondamentale della corda intiera e si sente l'armonico 2 dovuto alle vibrazioni delle sue due metà le quali continuano.

Ora, toccando la corda nel mezzo si produce ivi un nodo, e così si spegne il suo tono fondamentale cui corrisponde un ventre nel mezzo, e se si ode

l'armonico 2 corrispondente alle vibrazioni delle due metà, è segno che queste preesistevano assieme col tono fondamentale.

Parimenti, se si tocca la corda colla penna ad $^1/_3$ della sua lunghezza si sente l'armonico 3, ecc.

Perchè l'esperienza riesca bene conviene che la corda sia piuttosto tesa e accostare l'orecchio alla medesima.

Il quale fatto proviene da ciò, che una corda, come la maggior parte degli altri corpi sonori, mentre vibra intera, si divide spontaneamente in parti aliquote vibranti contemporaneamente per proprio conto, d'onde risulta non solo il tono fondamentale corrispondente alle vibrazioni della corda intiera, ma anche i toni armonici superiori corrispondenti alle vibrazioni delle sue parti aliquote, i quali sono percepiti dagli orecchi esercitati.

§ 91. Vibrazioni trasversali delle verghe e delle piastre.

1. Verghe. — Mentre le corde flessibili richiedono una tensione per vibrare, le verghe elastiche di vetro, metallo, ecc. non hanno bisogno di esser tese, ma basta che sieno fisse ed appoggiate in qualche punto. Esse sono impiegate come corpi sonori nelle ribebe, nelle scatole sonanti, nelle armoniche fatte con lastre di vetro o di acciaio, ecc.

Se si tratta di verghe della stessa sostanza, fisse od appoggiate nello stesso modo, allora *i loro numeri di vibrazioni trasversali sono in ragione diretta della grossezza o spessore, ed in ragione inversa del quadrato della loro lunghezza*, siccome esprime la formola $n = \frac{s}{l^2}$, nella quale n rappresenta il n° delle vibrazioni, s la grossezza, e l la lunghezza.

Per es., se, a parità di lunghezza, le *grossezze* sono: 1 e 2,
i *numeri di vibrazioni* stanno come: 1 a 2,
e se, a parità di grossezza, le *lunghezze* sono: 1 e 2,
i *numeri di vibrazioni* stanno come: 4 e 1.

2. Piastre. — Per le aste vibranti l'altezza del suono è indipendente dalla larghezza; ma aumentando questa oltre ad un certo limite, l'asta finisce per diventare una *piastra*. Le piastre di legno, di vetro, di metallo, vengono poste in vibrazione quando si fissano in un punto e si sfregano all'orlo con un archetto, oppure si battono con un martelletto. Queste piastre vibranti ven-

gono usate generalmente, non in forma piana, ma piuttosto in forma di bacino più o meno svasato; esse costituiscono allora le campane, i campanelli, i sonagli, i tamtam, ecc., le cui vibrazioni si compiono come quelle delle lastre piane.

Se si tratta di lastre della stessa sostanza, geometricamente simili, e divise ugualmente in parti aliquote durante la vibrazione, allora vale per esse la seguente legge: *i numeri di vibrazioni sono in ragione diretta della loro grossezza ed in ragione inversa della loro superficie.*

3. Diapason. — Il *diapason* o *corista* è uno stromento che serve a dare una nota di una determinata altezza, per accordare gli stromenti musicali. Nella sua forma più comune, consiste in una verga d'acciaio, ricurva ad U e sostenuta da un piede (fig. 155, pag. 256). Lo si mette in vibrazione, o battendolo sullo spigolo di una tavola, ovvero facendo passare tra i suoi due rami, o *rebbi*, un cilindro di metallo, o di legno, che li allontana momentaneamente, ovvero ancora strofinando i rebbi trasversalmente con un archetto.

Quando lo si tiene colla mano pel suo piede isolato nell'aria, il suo suono è poco sensibile, e per udirlo conviene avvicinarlo all'orecchio. Lo si rende più intenso e più sensibile avvitando il piede ad una cassa armonica, ovvero semplicemente appoggiando il suo piede su una tavola, perchè allora le sue vibrazioni si comunicano a questa, e l'aria viene scossa da una assai maggiore superficie vibrante.

La cassa armonica speciale dei coristi deve essere aperta ad un'estremità e chiusa all'altra, ed avere una lunghezza circa eguale ad $^1/_4$ della lunghezza d'onda del suo tono fondamentale, perchè così la colonna d'aria contenuta nella cassa può vibrare all'unisono col corista e rinforzarne il tono, come vedremo nello studio del fenomeno della risonanza.

Secondo le leggi delle vibrazioni delle verghe (pag. 307), i diapason più lunghi e più sottili dànno suoni più gravi, e quelli più corti e più grossi dànno suoni più acuti; permodochè *regolandone la lunghezza e grossezza si possono ottenere diapason che diano differenti note.*

Quello che si usa nelle orchestre è un la_3, ed è il suono che deve dare la 2ª corda del violino (la prima essendo il can-

tino). Altra volta si era convenuto che il corista delle orchestre dovesse fare 856 vibrazioni semplici per secondo; ma siccome i musici non ne facevano uso e regolavano i loro stromenti ad orecchio, accadde che la nota fondamentale dalla quale partivano andò sempre più elevandosi di altezza. Inoltre non era precisamente la stessa nei grandi teatri d'Europa; il che era un inconveniente per i cantanti che dovevano modificare le loro note passando da un teatro all'altro.

In Francia, nel 1859, una Commissione nominata espressamente dal Governo adottò siccome *corista normale*, obbligatorio per tutti gli stabilimenti musicali della Francia, quello che fa 870 vibr. semplici, ossia 435 vibr. doppie per secondo.

Il corista normale francese venne adottato dal Congresso internazionale tenuto in Vienna il 18 novembre 1885, nel quale l'Italia era rappresentata dal prof. Pietro Blaserna e dal maestro Arrigo Boito. Quindi tale corista è oggidì pure obbligatorio nel nostro paese.

§ 92. Tubi sonori.

1. Tubi a bocca ed a linguetta. — I *tubi sonori* sono tubi di legno o di metallo, a pareti sufficientemente rigide, dai quali si ottengono suoni mettendo in vibrazione la colonna aerea in essi contenuta, col soffiare aria attraverso ad un congegno detto *imboccatura*, posto ad una delle loro estremità.

Secondo la struttura dell'imboccatura, si distinguono in *tubi a bocca* ed in *tubi a linguetta*, e possono essere *aperti*, ovvero *chiusi* all'estremità opposta all'imboccatura.

2. Forma dei tubi a bocca. — Questi hanno un'apertura laterale che dicesi *bocca*. Tali sono i fischietti, i flauti, i tubi degli organi, i quali sono di legno con forma prismatica rettangolare (fig. 173), oppure di metallo (stagno o zinco) con forma cilindrica (fig. 174).

In essi si distingue (fig. 173):

1° Il *piede* (*p*), che è un tubo leggermente conico il quale viene applicato ad un mantice con cui si soffia aria;

2° La *camera dell'aria*, cavità a sezione triangolare nei tubi di legno, terminata superiormente in una fenditura (*o*) denominata *luce*;

3° La *bocca*, che è una apertura laterale, con una parete superiore tagliente (*s*), che dicesi *labbro superiore*, e una parete inferiore piana (*l*), detta *labbro inferiore;*

4° Infine al disopra della bocca vi è il tubo che contiene la *colonna aerea*.

3. Causa del suono nei tubi a bocca. — La corrente aerea che esce dalla fenditura della bocca frangendosi contro il labbro superiore tagliente produce già un sibilo, che si può sentire mediante un'imboccatura isolata, cioè non applicata ad un tubo sonoro, e che costituisce precisamente il suono del fischietto di una locomotiva, il quale consiste in una fenditura circolare, d' onde esce con forza il vapore e va ad urtare contro il labbro tagliente di una campanella. Questo sibilo è costituito da un gran numero di suoni discordanti, tra i quali la colonna aerea del tubo sceglie quello o quelli che essa può rinforzare vibrando longitudinalmente all'unisono.

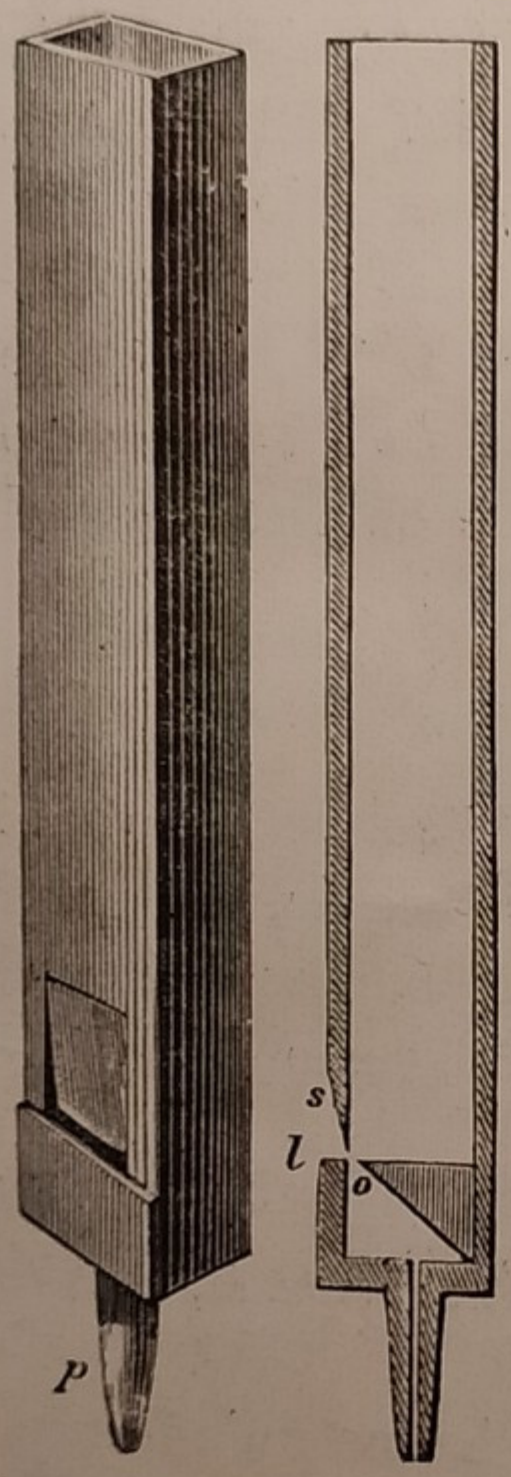


Fig. 173.

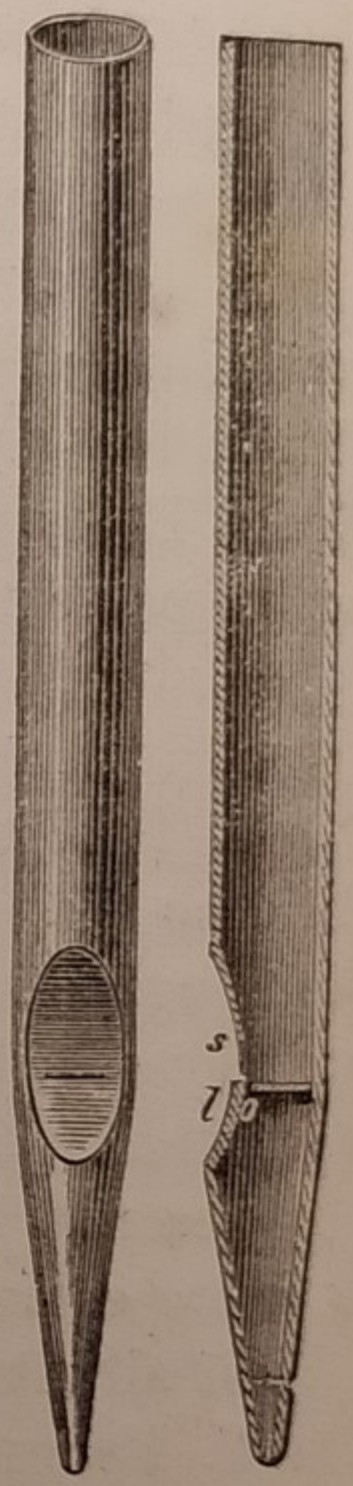


Fig. 174.

Il che è confermato dal seguente esperimento. Se si applica al mantice l'imboccatura di un tubo a bocca senza colonna aerea e si soffia aria in quella, si sente così solo un sibilo. Invece, circondando l'imboccatura con un tubo di carta, o cartone, o altra materia, aperto ai due capi, si ode un suono.

4. Vibrazioni longitudinali della colonna aerea nei tubi a bocca. — *Il moto vibratorio longitudinale dell'aria in un tubo aperto si può rendere manifesto* mettendo della sabbia grossolana su un tamburello di carta tesa su di un cerchietto di metallo e presentandolo alla sommità aperta del medesimo. Si vede

e sente così la sabbia saltellare vivamente per gli urti della colonna aerea contro la carta tesa. Se poi si abbassa il tamburello nel tubo (come indica la fig. 175), il moto oscillatorio dell'aria diminuisce, e diviene nullo, in certe posizioni in cui vi sono i nodi, come si vedrà in seguito.

Lo stesso moto vibratorio esiste pure all'estremità inferiore aperta, cioè alla bocca, e lo si può manifestare sia abbassando ivi il tamburello, sia applicando al labbro superiore una listerella dentata di carta finissima; quando il tubo suona si veggono i denti della listerella oscillare.

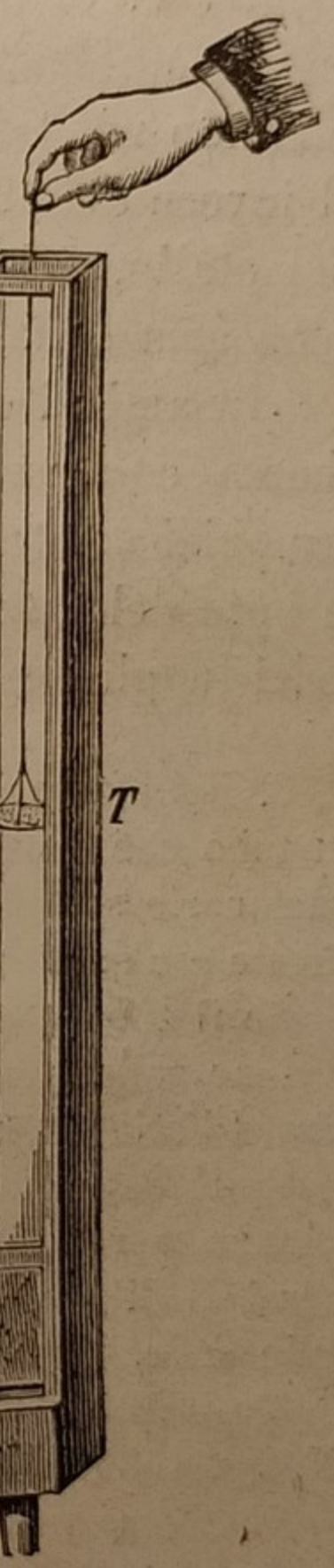


Fig. 175.

Se il tubo è chiuso all'estremità opposta all'imboccatura, ivi il moto vibratorio è nullo, perchè impedito dalla parete, cioè vi è un nodo, ma esiste sempre un ventre di vibrazione alla bocca.

Pertanto *nei tubi sonori a bocca il corpo vibrante è la colonna aerea, e non la parete del tubo*. Il che è anche provato dalle seguenti osservazioni:

1° Per le canne d'organo si impiega una sostanza poco elastica, come lo stagno o lo zinco.

2° Tubi di materia e grossezza diversa, a parità di forma, di dimensioni e di intensità del soffio, dànno suoni della stessa altezza.

3° Stringendo colla mano un tubo sonante, il suono non è alterato.

Se poi la parete è troppo sottile, in guisa da divenire flessibile, il suono, a parità di dimensioni del tubo, diviene alquanto più grave.

5. Suoni armonici dati dai tubi. — Se colla bocca o con un mantice si soffia in un tubo sonoro lungo e stretto, aperto o chiuso, una debolissima corrente d'aria in modo da farlo appena suonare, esso dà il suono più grave di cui è capace, il quale dicesi *fondamentale*. Indi rinforzando successivamente il soffio, si verificano le seguenti *leggi*, dette di Bernouilli:

1° *Se il tubo è aperto all'estremità opposta all'imboccatura, rappresentando con* 1 *il suono fondamentale, e rinforzando successivamente il soffio, si ottengono gli armonici successivi* 1, 2, 3, 4, 5, ecc.

2° *Se il tubo è chiuso all'estremità opposta all'imboccatura, rappresentando con* 1 *il suono fondamentale, e rinforzando successivamente il soffio, si ottengono i soli armonici dispari* 1, 3, 5, 7, ecc.

Però, il suono fondamentale si ottiene talvolta più facilmente soffiando nel tubo leggermente colla bocca, anzichè col mantice; ed invece del tubo descritto si può usare uno zufolo di legno o di metallo, del quale si turano colle dita tutti i fori, e in cui si soffia aria colla bocca.

In ambi i casi non è possibile ottenere da un tubo di lunghezza costante tutte le note della scala musicale, ma solo gli armonici del tono fondamentale. Si possono bensì ottenere tutte le note della scala da un medesimo tubo facendo vibrare differenti lunghezze della sua colonna aerea, come vedremo in seguito.

6. Nodi e ventri nei tubi sonori. — La colonna aerea contenuta in un tubo che suona si divide in un certo numero di parti aliquote, o di onde stazionarie separate da nodi, le quali nascono per l'interferenza delle onde dirette con quelle riflesse, come nelle corde e negli altri corpi sonori (pag. 297).

Se il tubo è chiuso all'estremità oppure all'imboccatura, la riflessione avviene sulla parete di chiusura. Se il tubo è aperto, la riflessione ha luogo contro l'aria esterna al tubo, perchè questa essendo libera in ogni senso costituisce un mezzo di elasticità differente, cioè meno resistente della colonna aerea che sta nel tubo, e alla superficie di separazione di due mezzi di diversa elasticità avviene sempre una riflessione, almeno parziale, delle onde.

Quando il tubo aperto dà il suono fondamentale, vi è un nodo nel mezzo [N. fig. 176 (1)] e un ventre (V, V′) a ciascuna estremità.

Il che si può provare sperimentalmente in diverse maniere. Dapprima *col tamburello cosparso di sabbia*, la quale, in un tubo avente una parete di vetro, si vede e sente salterellare vivamente alle due estremità aperte del tubo, mentre sta in quiete nel mezzo.

Quando il tubo aperto dà l'armonico 2, la colonna aerea si divide in quattro parti separate da nodi e ventri [nel modo rappresentato dalla fig. 176 (2)], cioè si produce sempre un ventre (V, V″) a ciascuna estremità, con un altro (V′) frammezzo, e due nodi (N, N′) fra i 3 ventri, a $^1/_4$ circa da ciascuna estremità.

Ciò si può anche accertare mediante il tamburello con sabbia.

Quando il tubo aperto dà il suono 3, i nodi e ventri dividono la colonna aerea in 6 parti presso a poco eguali [nel modo rappresentato dalla fig. 176 (3)].

Se il tubo è chiuso all'estremità opposta all'imboccatura, allora a quell'estremità vi è sempre un nodo, perchè la parete impedisce all'aria, in contatto colla medesima, di vibrare.

Perciò *quando il tubo dà il suono fondamentale* esiste un ventre alla bocca e un nodo all'estremità chiusa [come indica la fig. 177 (1)].

Quando il tubo chiuso dà l'armonico 3, vi si formano 2 nodi e 2 ventri, i quali dividono la colonna aerea in 3 parti presso a poco eguali [fig. 177 (2)], cosicchè la distanza fra un nodo e un ventre vicino è $= {}^1/_3$ della lunghezza del tubo.

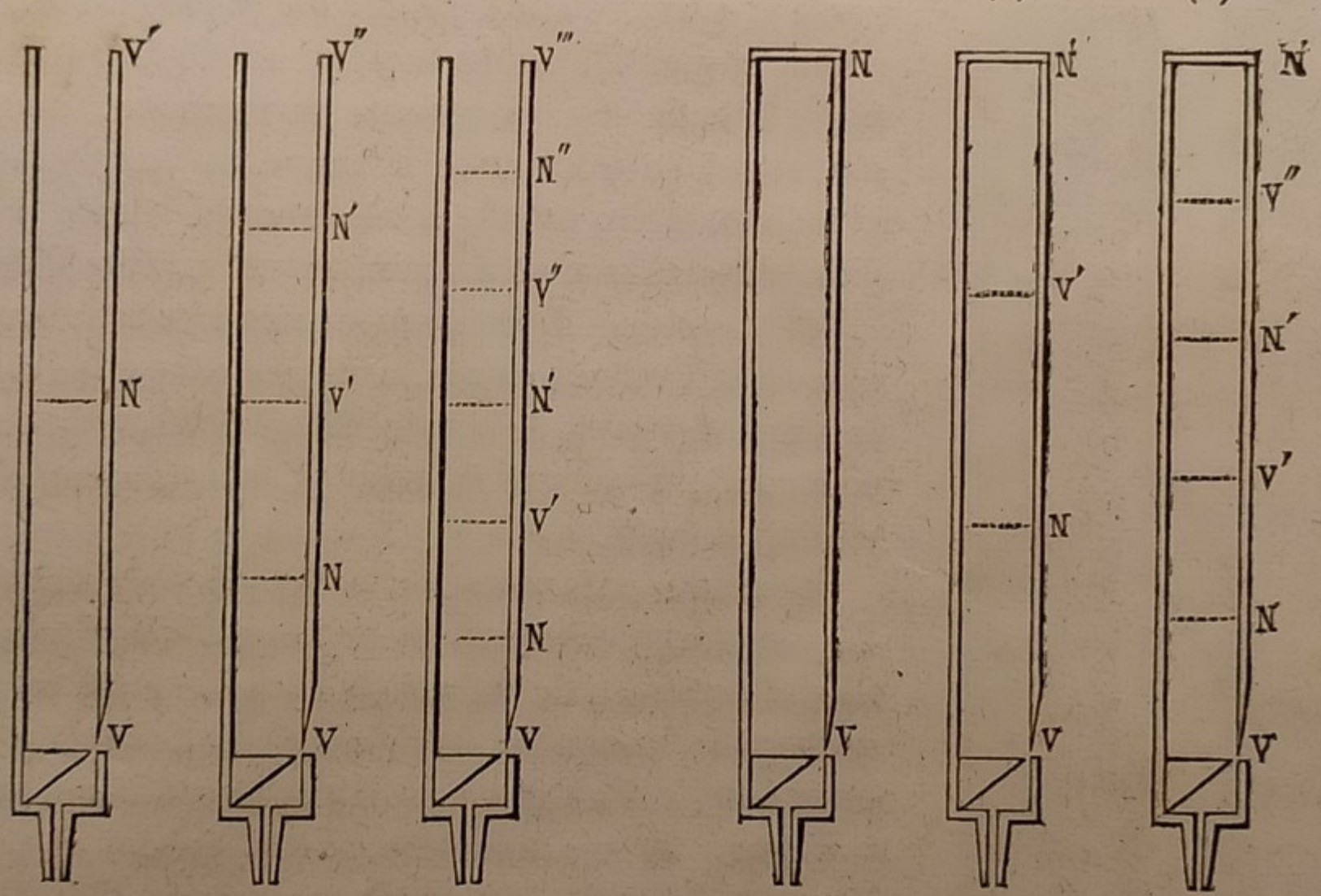


Fig. 176. Fig. 177.

Infine, quando il tubo chiuso dà l'armonico 5, vi si formano 3 nodi e 3 ventri [fig. 177 (3)], i quali dividono la colonna aerea in 5 parti presso a poco eguali, cosicchè la distanza fra un nodo e un ventre vicino è eguale ad ${}^1/_5$ della lunghezza del tubo.

Questi tre casi dei nodi ne' tubi chiusi si provano con altri esperimenti, come ora vedremo.

Però, *quanto si è detto vale solo pei tubi in cui la lunghezza è almeno 12 volte il diametro*, permodochè le superficie delle onde sieno sensibilmente piane e perpendicolari alla lunghezza, se no il 1° nodo dalla parte dell'imboccatura risulta alquanto più lontano e così pure il successivo ventre, cioè *il tubo risuona come se avesse una lunghezza alquanto maggiore.*

7. Caratteri che distinguono i nodi e i ventri. — Si è detto che i nodi e i ventri nelle colonne aeree sonore nascono, come negli altri corpi

sonori, dall'interferenza delle onde dirette colle riflesse all'estremità del tubo, sia esso aperto o chiuso. Per tale riflessione si stabiliscono nel medesimo onde longitudinali stazionarie, che si distinguono dalle onde longitudinali progressive, per le quali si propaga il suono, per ciò che queste hanno alternativamente la massima condensazione e rarefazione nel luogo in cui le particelle raggiungono la massima velocità di vibrazione, cioè nei punti di mezzo delle semionde condensate e rarefatte (pag. 263), mentre *le onde longitudinali stazionarie hanno la massima condensazione o rarefazione nei punti di riposo o nodi, e la densità naturale nei punti di massima vibrazione o ventri.*

Ciò avviene perchè, nel caso delle onde longitudinali stazionarie, da ambe le parti di un nodo le particelle si muovono contemporaneamente in opposto senso, cioè, o da ambe le parti accorrono verso il nodo, d'onde risulta in questo condensazione, ovvero da ambe le parti si allontanano dal nodo, d'onde risulta in esso rarefazione, mentre nei ventri le particelle si muovono contemporaneamente nello stesso senso e colla stessa velocità, e perciò non si avvicinano nè si allontanano.

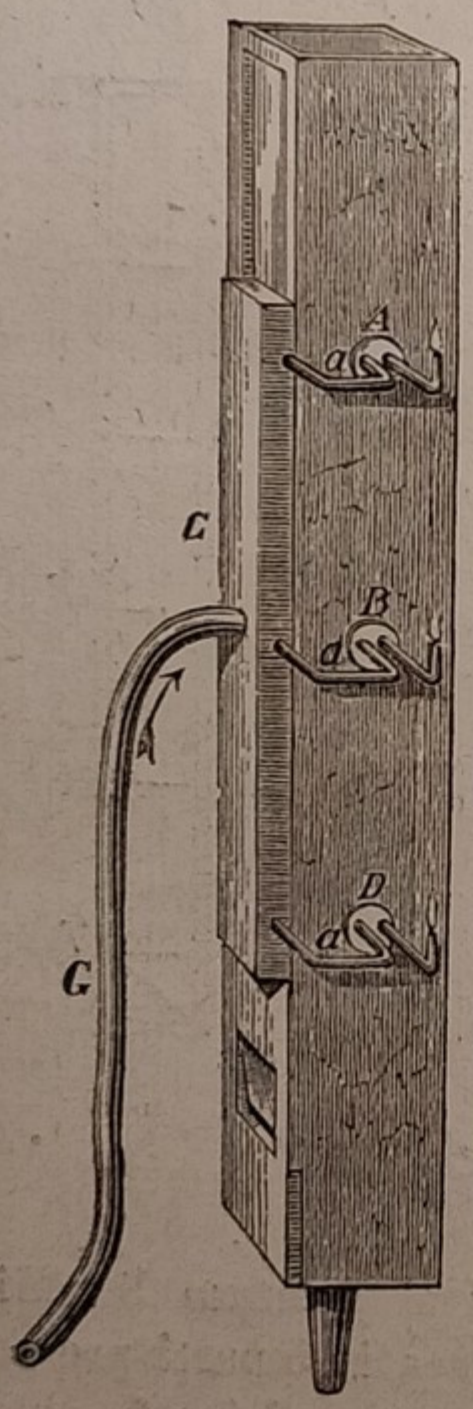


Fig. 178.

Nel caso poi delle *onde stazionarie trasversali*, come quelle d'una corda, o di una verga, da ambe le parti del nodo le particelle si spostano in senso contrario, e perciò in esso gli spostamenti sono minimi o nulli.

Pertanto *una colonna aerea vibrante longitudinalmente si divide in onde longitudinali stazionarie, separate da strati di riposo o nodi, in cui avvengono massime variazioni di densità e di pressione, e fra i quali trovansi strati di massima ampiezza di vibrazione o ventri, in cui si mantiene la densità e la pressione esterna.*

8. Prova sperimentale colle fiamme manometriche. — Sul detto fatto è fondato il *metodo delle fiamme manometriche* di Koenig per provare la distribuzione dei nodi e dei ventri nei tubi sonori, aperti e chiusi, quando danno le rispettive serie di suoni armonici.

Mediante un tubo (G, fig. 178) si fa arrivare del gas luce in una cassa (C) collocata di fianco ad una delle pareti di un tubo sonoro quadrangolare, dalla quale partono tre tubi (*a*) di caucciù, che conducono il gas ad altrettante capsule cui sono applicati dei becchi per accenderlo. La parete posteriore di queste capsule è costituita da una membranella tesa di buccio (budello di bue), la quale trovasi in contatto coll'aria vibrante del tubo.

Ora, quando una di tali capsule si trova in corrispondenza di un nodo, nell'istante in cui avviene in questo una condensazione dell'aria del tubo

la membrana è spinta verso la capsula, comprime il gas, e la fiammella si eleva; invece, quando nel nodo avviene una rarefazione, la membranella cede alla pressione del gas della capsula, la quale si dilata, cosicchè la fiamma si abbassa, e, se è piccola, si spegne.

Infine, se una capsula è collocata in corrispondenza di un ventre, siccome ivi non avvengono variazioni di densità e di pressione, la fiamma rimane stabile.

Per dimostrare, per es., *la disposizione dei nodi e dei ventri in un tubo aperto che dà i suoni* 1 *e* 2, si accendono i tre becchi (A, B, D) e si fa dapprima rendere al tubo il suono fondamentale, per cui si vede spegnersi la fiamma del becco mediano (B) che corrisponde al nodo in cui avvengono massime variazioni di densità e pressione [fig. 180 (1)], mentre le altre due fiamme rimangono accese.

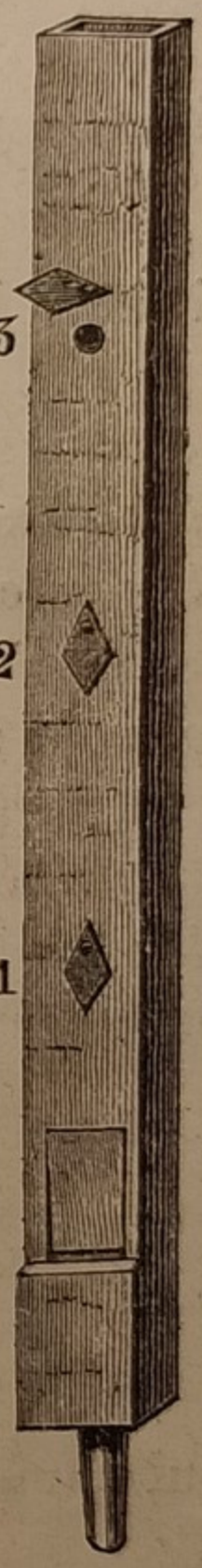


Fig. 79.

Invece, se si rinforza la corrente d'aria nel tubo, per modo da ottenere il suono 2, non si spegne più la fiamma del becco mediano, ma bensì quelle degli altri due, superiore e inferiore, perchè [come indica la fig. 180 (2)], i i nodi si formano allora in corrispondenza dei detti becchi, mentre in corrispondenza del mediano si forma un ventre.

Un'esperienza analoga si fa *per dimostrare la disposizione dei nodi e dei ventri in un tubo chiuso.*

9. Prova sperimentale con tubi a valvole. — *Si può pure dimostrare la disposizione dei nodi e dei ventri con un tubo munito di fori chiusi da valvole* (fig. 179). Se si apre un foro corrispondente ad un ventre, il suono non muta, perchè ivi l'aria interna ha la stessa densità dell'esterna; invece se si apre il foro corrispondente ad un nodo, la densità diviene ivi eguale a quella dell'aria esterna, cosicchè vi si forma un ventre, e il suono varia perchè viene cangiata la disposizione dei nodi e dei ventri. Per. es., se si apre il foro mediano di un tubo aperto che dà l'armonico 2, cui corrisponde un ventre nel mezzo [fig. 176 (2)], il suono non varia; invece se il tubo dà il suono fondamentale 1, nel qual caso vi è un nodo nel mezzo [fig. 176 (1)], nasce ivi un ventre, e perciò il suono passa all'ottava acuta, perchè la distanza fra due ventri (quello dell'imboccatura e quello del mezzo) diviene metà della precedente, e quindi il tubo suona come uno di metà lunghezza, il cui numero di vibrazioni è doppio, come vedremo nel nº 11.

Quando il tubo rende il suono 3 esso è diviso in 3 parti eguali separate da ventri [fig. 176 (3)]; perciò, aprendo un foro collocato ad $^1/_3$ della sua lunghezza, il suono non muta, mentre diviene più grave coll'aprirne uno in mezzo, ove si determina un ventre al posto del nodo; invece il suono diviene più acuto se si apre un foro collocato ad $^1/_4$.

10. Formole e leggi dei tubi sonori. — Rappresentando:

con n il numero delle vibrazioni,
» v la velocità del suono nel gas che riempie il tubo,
» l la lunghezza del tubo,
» k un numero intero qualunque, permodochè $2k-1$ esprima un numero dispari,

i numeri di vibrazioni dei tubi sonori, aperti e chiusi, sono espressi dalle seguenti formole:

pei *tubi aperti* $$n = k\frac{v}{2l}; \qquad \ldots (1)$$

pei *tubi chiusi* $$n = (2k-1)\frac{v}{4l}; \qquad \ldots (2)$$

le quali esprimono le seguenti leggi: *Il numero delle vibrazioni dei tubi sonori è in ragione diretta della velocità del suono nel gas che riempie il tubo, e in ragione inversa della lunghezza di questo, ed è indipendente dalla sezione finchè questa è piccola rispetto alla lunghezza.*

11. Prove sperimentali della legge delle lunghezze. — Si prova che: *il numero delle vibrazioni è in ragione inversa della lunghezza del tubo*, soffiando leggermente aria in otto tubi, tutti aperti o tutti chiusi, aventi le lunghezze decrescenti:

$$1, \quad \frac{8}{9}, \quad \frac{4}{5}, \quad \frac{3}{4}, \quad \frac{2}{3}, \quad \frac{3}{5}, \quad \frac{8}{15}, \quad \frac{1}{2};$$

si sentono così le note della gamma:

do, re, mi, fa, sol, la, si, do,

i cui numeri di vibrazioni:

$$1, \quad \frac{9}{8}, \quad \frac{5}{4}, \quad \frac{4}{3}, \quad \frac{3}{2}, \quad \frac{5}{3}, \quad \frac{15}{8}, \quad 2,$$

sono reciproci di quelli che esprimono le lunghezze.

Si dimostra la stessa legge con un solo tubo a bocca, lungo e sottile, nel quale è scorrevole uno stantuffo (fig. 180) con cui si può limitare la colonna d'aria vibrante. Soffiandovi leggermente aria con un mantice, o meglio colla bocca, il tubo rende il suono fondamentale; se allora si mantiene costante il soffio, e

si sposta successivamente lo stantuffo in modo da far vibrare frazioni della lunghezza del tubo, espresse dai valori reciproci dei numeri relativi di vibrazioni delle diverse note della scala, si ottengono appunto queste, come nelle corde.

Lo stesso fatto si prova con uno zufolo di metallo o di legno, munito di fori opportunamente disposti nella sua lunghezza, dal quale, con soffio costante, si ottengono le diverse note della gamma, aprendo successivamente i fori dall' estremità opposta all' imboccatura verso di questa, perchè così si produce il primo ventre sempre più vicino alla bocca, ed è come se si tagliasse il tubo e lo si rendesse successivamente più corto.

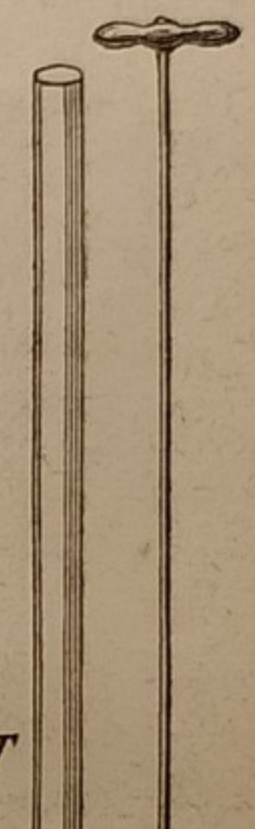


Fig. 180.

La legge delle lunghezze si verifica approssimativamente in tutti gli stromenti ad aria, perchè in questi, per avere i suoni più alti, la colonna aerea oscillante viene accorciata, sia coll'aprire un foro, mediante una chiave, o col sollevamento del dito, o col raccorciare qualche parte mobile.

12. Prova sperimentale della legge della velocità. — *La influenza della velocità* è dimostrata dalla seguente esperienza:

Riscaldando colle mani, o con un panno caldo, o con una fiamma, un tubo sonoro metallico, il suono si inacutisce, perchè col crescere della temperatura cresce la velocità v del suono (pag. 259), e il numero delle vibrazioni dei tubi è in ragione diretta di tale velocità.

Quindi, due tubi all'unisono ad una medesima temperatura non lo sono più quando uno di essi è riscaldato; perciò fanno sentire dei battimenti, cioè aumenti e diminuzioni dell'intensità del suono, come vedremo in seguito. Parimenti quando il flauto si riscalda per il contatto delle mani e della bocca tende a dare suoni alquanto più acuti.

13. Relazione fra i toni fondamentali di uno stesso tubo aperto o chiuso. — Dalle precedenti formole (1) e (2) (pag. 316) consegue ancora che: *il suono fondamentale di un tubo aperto è l'ottava alta di quello di un tubo chiuso di eguale lunghezza.*

Infatti, ponendo in esse $k = 1$ per avere il suono fondamentale, si ottiene:

pei *tubi aperti* $$n = \frac{v}{2\,l}; \qquad (2)$$

pei *tubi chiusi* $$n = \frac{v}{4\,l}. \qquad (2)$$

Fig. 181.

Ora, il 1° numero è appunto doppio del 2°, e quindi il 1° suono è l'ottava alta del 2°.

Ciò si prova facendo suonare successivamente uno stesso tubo aperto e chiuso. Nel secondo caso si sente l'ottava bassa del suono dello stesso tubo aperto.

Ovvero, siccome questa legge si può anche enunciare così: *Un tubo chiuso dà lo stesso tono fondamentale di un tubo aperto di lunghezza doppia*, la si dimostra sperimentalmente anche facendo scorrere nel mezzo di un tubo aperto un diaframma munito di un'apertura (fig. 181). Quando questa apertura trovasi in corrispondenza della sezione del tubo si ha un tubo aperto di una certa lunghezza; invece quando la parte piena del diaframma viene a chiudere il tubo si ha un tubo chiuso di metà lunghezza. Ora se il tubo rende il suono fondamentale nei due casi, si sente la stessa nota.

14. La legge dei suoni armonici ricavata dalle formole. — Infine le formole precedenti contengono pure la legge già enunciata (pag. 312) dei *suoni armonici* dati da uno stesso tubo a misura che si rinforza il soffio.

Infatti, ponendo per k nella formola (1) dei tubi aperti

i numeri 1, 2, 3, 4, 5,

si ottengono per n

i valori $\frac{v}{2l}$, $2\frac{v}{2l}$, $3\frac{v}{2l}$, $4\frac{v}{2l}$, $5\frac{v}{2l}$, ...

i quali stanno fra loro come i numeri 1, 2, 3, 4, 5.....

Invece ponendo per k i medesimi numeri nella formola (2) dei tubi chiusi si ottengono per n

i valori $\frac{v}{4l}$, $3\frac{v}{4l}$, $5\frac{v}{4l}$, $7\frac{v}{4l}$, $9\frac{v}{4l}$, ...

i quali stanno fra loro come i numeri dispari 1, 3, 5, 7, 9.....

15. Tubi a linguetta. — Nei tubi a linguetta l'aria è fatta vibrare mediante laminette metalliche che si chiamano *linguette* o *ancie*. Queste si distinguono in *battenti* e *libere*.

Un tubo a linguetta battente consta dei seguenti elementi:

1° Il *canaletto* (*c*, fig. 182), che è un mezzo cannello, chiuso in fondo, aperto lateralmente ed in alto, fisso ad un tappo forato (P) di legno;

2° La *linguetta* (*l*), una lamina elastica d'ottone fissa nella parte superiore, la quale appoggia sull'orlo del canaletto, ma se ne distacca inferiormente per modo da poter vibrare;

3° La *molla* a *rasiera* (*a r*), un filo di ferro ripiegato che si appoggia contro la linguetta, e serve a limitarne la parte vibrante:

4° Il *portavento*, che è un tubo di legno rettangolare (V, fig. 183) in cui si introduce il canaletto in modo da chiuderlo col tappo (P), e dentro il quale giunge, per un piede inferiore, l'aria soffiata dal mantice;

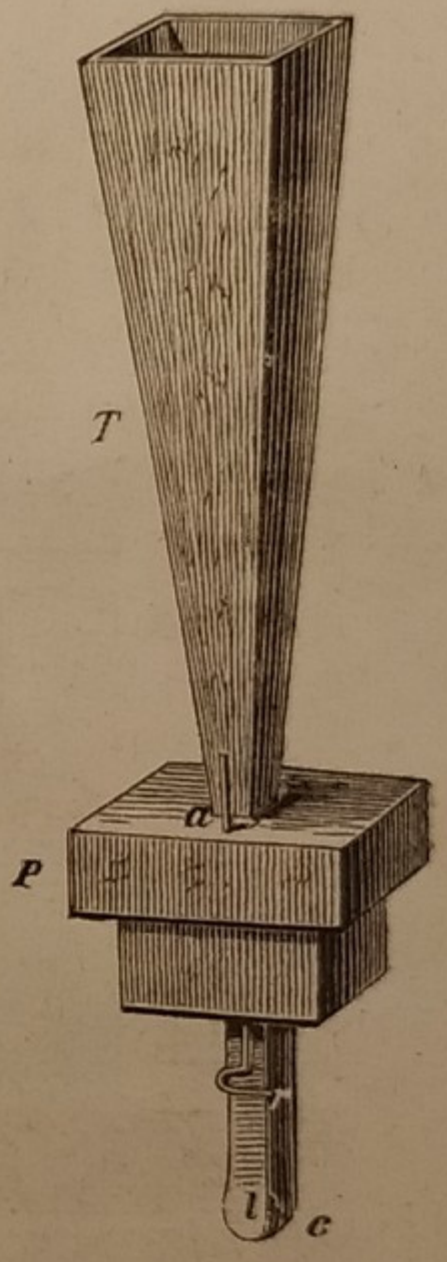


Fig. 182.

5° Il *tubo* piramidale (T) contenente la colonna aerea vibrante, posto al di sopra del tappo (P).

Un tubo a linguetta libera si compone: 1° del *canaletto* (*c*, fig. 184), che in questo caso è una cassetta rettangolare, in una delle cui pareti laterali, di metallo, è praticata un'apertura longitudinale o *finestra:* 2° della *linguetta* (*l*), la quale essendo un po' più stretta della finestra, può, oscillando, passare da una parte e dall'altra della sua parete; 3° della *rasiera* (*a r*); 4° del *portavento* (V. fig. 183); 5° del *tubo* (T). contenente la colonna aerea vibrante (che si applica al foro O, fig. 184) come nei tubi a linguetta battente.

16. Uso dei tubi a linguetta. — Si usano le *linguette battenti* negli organi, le *linguette libere* (fig. 185) nelle fisarmoniche.

Le prime danno suoni alquanto ingrati per gli urti delle medesime contro gli orli del canaletto. Quelli delle linguette libere sono più puri.

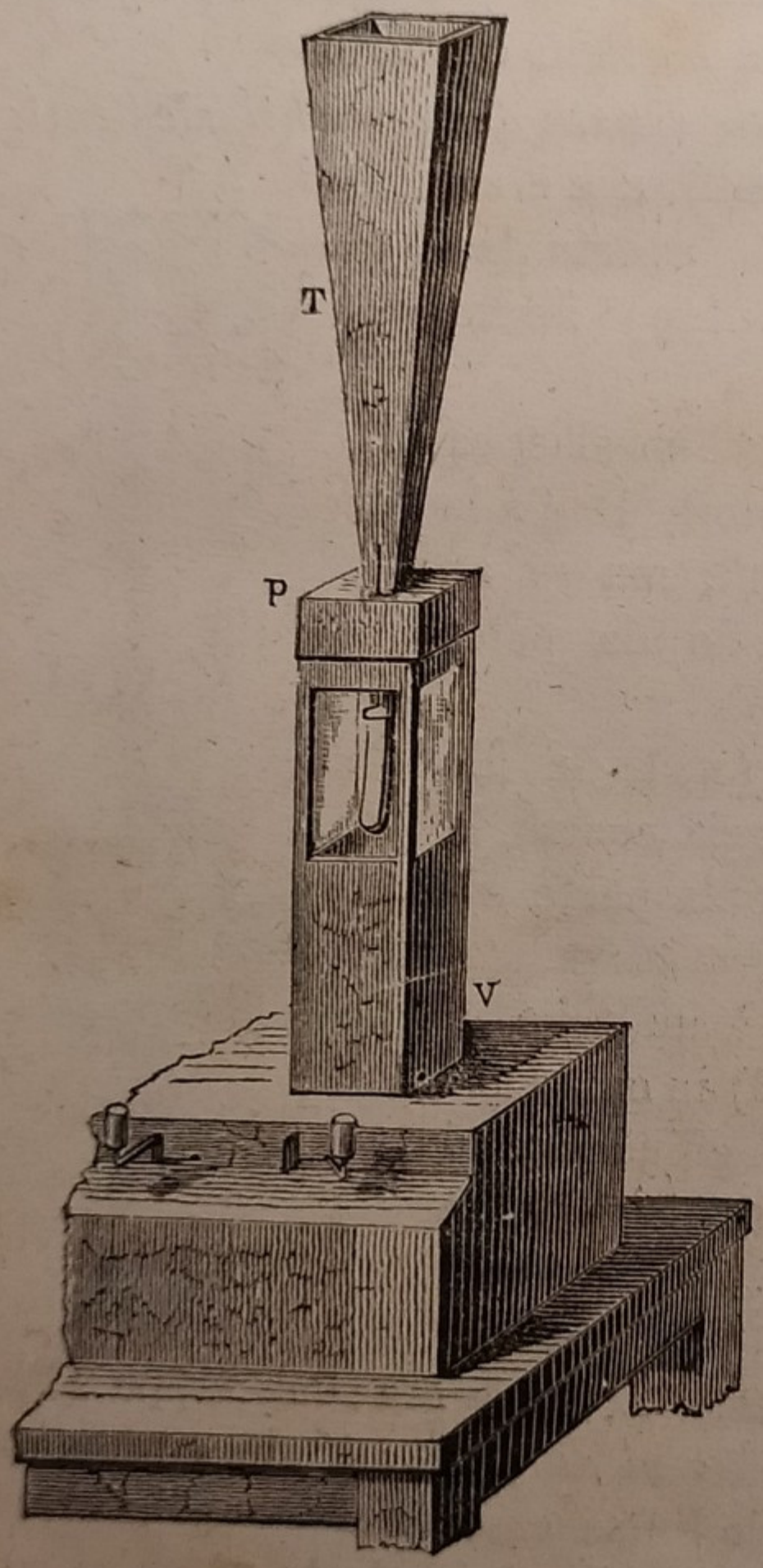


Fig. 183.

17. Gli stromenti musicali ad aria più in uso si possono distinguere in tre classi.

1° *Stromenti con imboccatura a bocca.* Tali sono il flauto, il fischietto, i tubi a bocca dell'organo.

2° *Stromenti con imboccatura a linguetta.* Esempi: il clarinetto, l'oboe, il fagotto, i tubi ad ancia dell'organo, la fisarmonica. Però il clarinetto ha una sola linguetta (di canna), mentre l'oboe ed il fagotto hanno linguetta doppia.

3° *Stromenti con imboccatura ad imbuto:* tali sono la maggior parte di quelli di ottone come: il corno, la tromba, il trombone, il bombardone, l'oficleide, ecc., i quali si possono anche considerare come stromenti a linguette, perchè il suono viene generato mediante le labbra del suonatore appoggiate contro l'imboccatura, le quali vengono poste in vibrazione soffiando leggermente a traverso la fenditura compresa fra le medesime, come si può accertare osservando le labbra di un suonatore in un'imboccatura di vetro. In simile guisa si ottiene zufolando colla bocca, cioè soffiando od aspirando l'aria fra le labbra, la lingua e i denti.

18. L'organo vocale umano, detto *laringe*, è uno stromento ad *ancia*. Esso si trova nella parte anteriore del collo, ove nell'uomo si osserva la prominenza detta *pomo d'Adamo*. È una specie di tubo largo e corto che superiormente si apre nella parte posteriore della bocca, ed inferiormente

continua colla trachea, canale fibrocartilagineo che conduce l'aria nei polmoni. La laringe è formata da piastre cartilaginee di diversa forma, le quali possono essere mosse da appositi muscoli, in modo da aumentare o diminuire la cavità da esse formata.

L'*ancia* è costituita da membrane elastiche, dette *corde vocali*, che attraversano la laringe alquanto obliquamente dall'innanzi all'indietro, lasciando fra loro un'apertura detta *glottide*, che nella deglutizione viene chiusa da una valvola soprastante detta *epiglottide*. Le corde vocali sono quattro, due superiori e due inferiori per parte, e tra esse rimangono due cavità, dette *ventricoli* della glottide, o *ventricoli del Morgagni*.

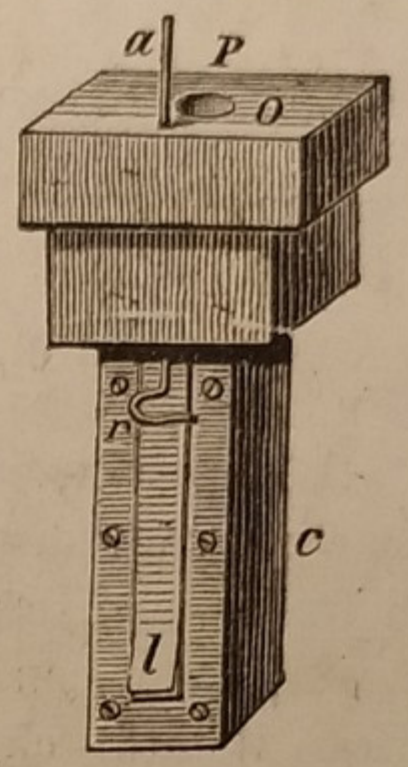


Fig. 184.

19. Come nasce il suono nell'organo vocale. — *Quando la laringe emette un suono* le corde vocali inferiori vengono tese più o meno da muscoli applicati alle cartilagini su cui quelle prendono inserzione, cosicchè la glottide si riduce, per gran parte della sua lunghezza, ad una fenditura assai stretta, i cui lembi, messi in vibrazione dall'aria spinta dai polmoni, lasciano effluire questa ad intervalli, in modo che essa mette in vibrazione la massa aerea sovrastante, come negli stromenti ad ancia (pag. 319). Secondo la varia tensione delle corde vocali, l'apertura più o meno grande della glottide e l'intensità della corrente aerea, nascono suoni di diversa altezza.

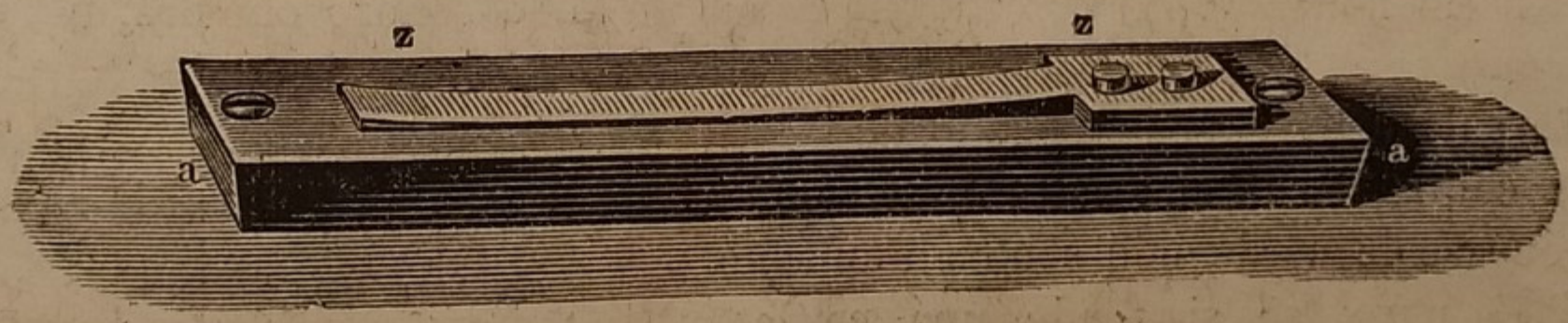


Fig. 185.

Quindi si vede che i polmoni costituiscono il mantice, la trachea è il portavento, la laringe è l'imboccatura ad ancia, mentre le fauci, la bocca e le cavità nasali contengono la massa aerea posta in vibrazione.

20. Limiti della voce umana. — La voce umana si estende appena per quattro ottave dal mi_1 al do_5; ed in uno stesso individuo solo per circa due ottave.

21. Voci maschili e femminili. — Nella voce maschile si distingue, per ordine di altezza, quella del *basso*, del *baritono*, e del *tenore;* e nella voce femminile, il *contralto*, il *mezzo soprano* e il *soprano*.

§ 93. Risonanza.

1. Fenomeno della risonanza. — Un corpo sonoro vibrante può eccitare il moto vibratorio in altri corpi capaci di vibrare all'unissono, ma non in quelli che non possono vibrare all unissono.

Tale fenomeno chiamasi *risonanza*.

2. Esperienze di risonanza dei corpi solidi. — Se due diapason all'unisono vengono disposti su una tavola, colla bocca delle loro casse armoniche di fronte, a distanza più o meno grande, quando si fa vibrare uno di essi strofinandolo con un archetto, anche l'altro entra in vibrazione, siccome lo prova il fatto che toccando colla mano i rebbi del diapason che è stato strofinato, cessa il suono del medesimo, ma si sente quello dell'altro. Se invece si altera l'unisono dei due diapason, attaccando per es. un pezzo di cera ad un capo di un rebbio del corista non strofinato, oppure avvolgendolo con un corto tubetto di gomma, il che ne fa abbassare il tono, allora strofinando il primo diapason il secondo sta muto. Il fenomeno è più o meno sensibile secondo la distanza dei diapason.

Parimenti se si fissano sul mantice 8 tubi che diano le diverse note di una gamma e si presenta la bocca della cassa armonica di un corista alla bocca del tubo sonoro che dà la sua nota, il corista entra in vibrazione, mentre ciò non avviene presentandola ad un tubo sonoro che dia una nota diversa.

Se sul sonometro si tendono due corde affatto all'unisono, i cavalieri di carta collocati sull'una salterellano quando si fa oscillare l'altra; il che non avviene se le corde non sono all'unisono.

Così pure, se si tende una corda sul sonometro finchè dia una nota all'unisono con quella di un diapason, facendo suonare questo, ed appoggiando il suo piede sulla tavola del sonometro, si vedono i cavalieri di carta salterellare sulla corda. Fatta variare la tensione di quella, sì che essa più non dia la stessa nota del diapason, i cavalieri stanno immobili.

Se si apre la cassa di un pianoforte e si solleva lo smorzatore (premendo il pedale del forte), indi si cantano le vocali, si sentono ripetute da quelle corde che sono capaci di vibrare all'unissono col loro tono; il che si può accertare con un pianoforte orizzontale per mezzo di cavalieri di carta collocati sulle medesime, ovvero dallo spegnersi del tono col toccarle. Così pure nelle camere ove esistono pianoforti si sentono sovente questi rispondere ai suoni che si producono in vicinanza.

3. Esperienze di risonanza dei corpi aeriformi. — Se si tiene colla mano il piede di un corista vibrante, di 870 vibrazioni semplici per secondo (fig. 186), e lo si presenta alla bocca di un recipiente cilindrico di circa 5 *cm.* di diametro, e più lungo di 20 *cm.*, non si sente alcun rinforzo del suono

del corista; ma se si versa acqua nel recipiente per modo da diminuire la lunghezza della colonna aerea contenuta nel recipiente, quando questa è di circa 20 *cm.* si sente il suono del corista rinforzato.

Ciò avviene perchè la lunghezza delle semionde del tono fondamentale di quel corista è, a 15° C., $\frac{340}{870} = 0^m,391$, ossia circa 40 *cm.*, e quindi 20 *cm.* è la lunghezza di $^1/_4$ dell'onda. Ora la lunghezza che deve avere un tubo chiuso ad una estremità per dare una data nota fondamentale è precisamente $^1/_4$ della lunghezza dell'onda di quel tono; perciò la detta colonna aerea può vibrare sincronamente col corista e così rinforzare il suono.

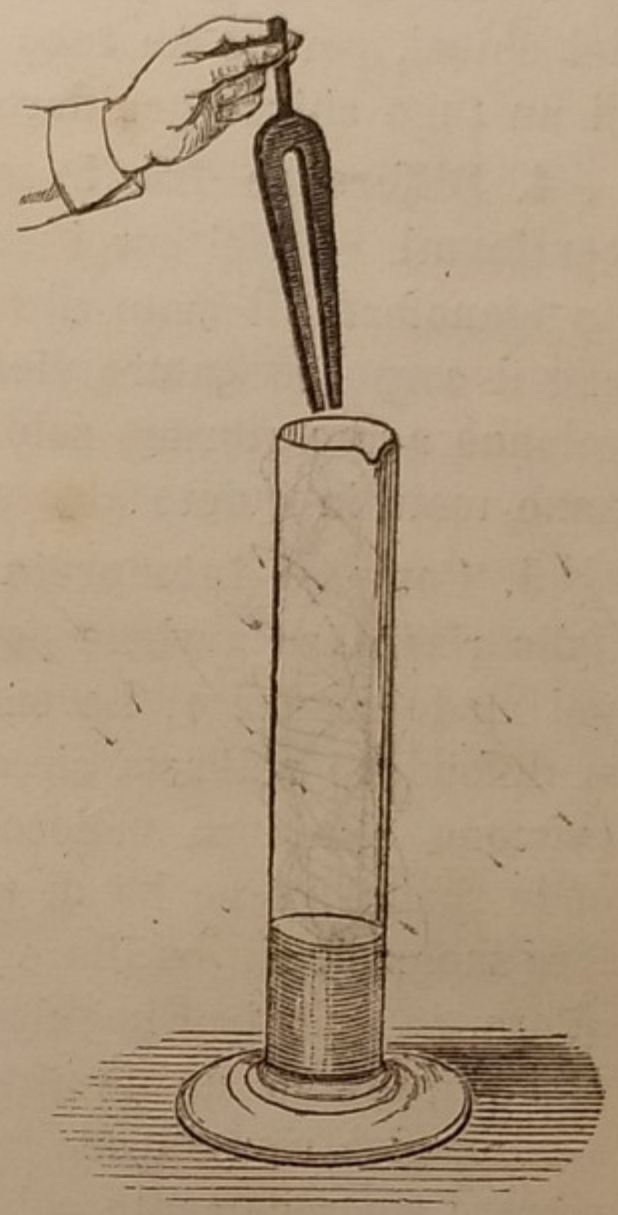
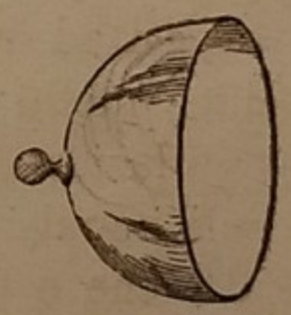


Fig. 186.

Se si fa l'esperienza con un corista do_3 di 512 vibrazioni semplici per secondo, la lunghezza delle cui semionde è $\lambda = \frac{340}{512} = 0{,}66\ m.$, cioè circa 66 *cm.*, si trova che la lunghezza del tubo chiuso che ne rinforza il suono è circa 33 *cm.*

Però se la lunghezza dei tubi non è almeno 12 volte maggiore della larghezza, la lunghezza della colonna aerea che produce rinforzo è un poco minore di $^1/_4$ della lunghezza d'onda, perchè allora la legge della lunghezza non è esatta e i tubi risuonano come se avessero lunghezza alquanto maggiore.

Parimenti, se si mette un corista in vibrazione e poi lo si presenta alla estremità aperta di una serie di tubi sonori di diversa lunghezza, si sente rinforzato il suono dal tubo la cui colonna aerea quando è in vibrazione dà la stessa nota, e non dagli altri tubi.



Così pure, se si tiene un corista in mano pel suo piede e dopo averlo scosso lo si presenta alla bocca della sua cassa di risonanza, che ha una lunghezza circa $^1/_4$ della sua lunghezza d'onda, si ode il suono rinforzato, mentre ciò non avviene se la cassa di risonanza ha una lunghezza diversa.

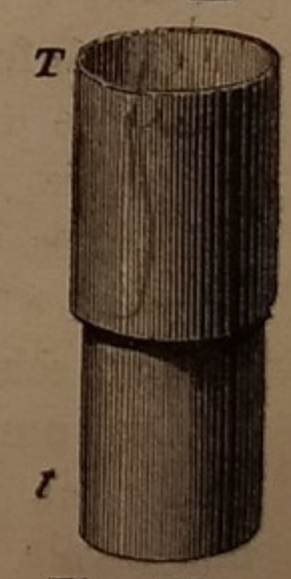


Fig. 187.

Per eccitare più energicamente la risonanza in una colonna aerea si presenta una campana vibrante ad un tubo di cartone del diametro di 12 a 15 *cm.*, composto di due parti scorrevoli l'una nell'altra per poterne far variare la lunghezza, e l'inferiore dei quali è chiuso (fig. 187); si strofina delicatamente l'orlo della campana con un archetto, procurando che essa dia il tono più basso di cui è capace, e si regola la lunghezza del tubo finchè si sente un intenso rinforzo. Quando si è ottenuto il massimo rinforzo, se si varia la lunghezza del tubo quello diminuisce o sparisce affatto.

Nel fare tale esperienza del rinforzo del suono di una campana bisogna avvicinare la bocca del tubo ad un ventre e non ad un nodo della campana, e il tubo deve avere un diametro almeno metà di quello della campana.

I tubi aperti per rinforzare un suono debbono avere lunghezza doppia dei chiusi, perchè un tubo aperto deve avere lunghezza doppia di quella di un tubo chiuso per dare la stessa nota (pag. 318).

4. Differenze fra la risonanza dei corpi solidi e quella dei corpi aeriformi. — Nei corpi solidi, come nel caso dei coristi e delle corde di un pianoforte, il moto vibratorio eccitato per risonanza continua anche dopo che il corpo eccitatore viene fatto tacere toccandolo colla mano; invece le colonne aeree vibrano solo finchè sono scosse dal corpo eccitatore e ritornano tosto in quiete al cessare del movimento di questo.

5. Come si interpreta il fenomeno della risonanza. — Il fenomeno della risonanza avviene per comunicazione di moto oscillatorio e si spiega nel modo seguente: Le onde sonore, che partono dal corpo in vibrazione e si diffondono nell'aria circostante, scuotono i corpi che incontrano ed imprimono alle loro molecole successivi impulsi. Se tra i corpi urtati dalle onde sonore ve ne ha di tali, le cui dimensioni ed elasticità permettano alle loro molecole di oscillare sincronamente colle molecole dell'aria vibrante, allora, in questi gl'impulsi si vanno sommando, epperò dopo un certo tempo essi acquistano un proprio moto oscillatorio, sincrono a quello del corpo sonoro, cioè riproducono la medesima nota. Invece nei corpi che non possono vibrare sincronamente col sonante corpo i successivi impulsi loro comunicati dalle onde sonore non essendo concordanti non si sommano, ma si contrariano, per cui tali corpi rimangono in quiete.

Vi sono molti fenomeni meccanici analoghi alla risonanza. Per es.: se tre pendoli, due di eguale lunghezza e il terzo di lunghezza diversa, sono appesi ad un medesimo sostegno, mettendo in oscillazione uno dei primi due, quello di eguale lunghezza, che può oscillare d'accordo, entra pure in oscillazione, ma non l'altro di lunghezza diversa. Così pure mediante piccoli impulsi concordanti si possono mettere in oscillazione grandi campane, altalene e ponti sospesi.

6. Rinforzo dei suoni deboli mediante la risonanza. — Una corda oscillante da sola nell'aria libera dà un suono debolissimo, perchè urta un piccolissimo numero di particelle aeree; invece gli stromenti a corda danno suoni abbastanza intensi, perchè le pareti delle casse sonore su cui sono tese, come pure l'aria in esse acclusa, risuonano insieme, e per la maggiore superficie scuotono un più gran numero di particelle aeree.

Così pure il tono di un corista scosso si sente poco quando si tiene in mano; ma mettendolo in contatto con una cassa armonica, o anche solo una tavola di legno, si ode assai più intenso, per la risonanza della tavola e dell'aria in essa contenuta.

Nello stesso modo il *tic-tac* di un oriuolo si sente più forte se appoggiato su di una tavola che se sospeso nell'aria.

Quindi l'uso delle casse armoniche di legno asciutto, fibroso, elastico,

che vibrando assieme col corpo sonoro ne rinforzano il suono. Il rinforzo è prodotto dall'aria della cassa e dalle pareti.

Le vibrazioni di queste si possono rendere visibili collocando su di esse uno sgabelletto di sughero, o un fantoccino con gambe di setola, il quale si vede saltellare quando lo strumento suona.

In generale, le colonne aeree lunghe rinforzano solo un suono, mentre quelle di grandi dimensioni trasversali, come le masse aeree delle casse armoniche degli stromenti a corde, rinforzano più o meno tutti i suoni; però vi è sempre qualche tono più rinforzato degli altri.

7. Risonatori di Helmholtz. — Sul fatto della risonanza delle masse aeree sono fondati i *risonatori* di Helmholtz. Essi consistono in globi cavi di vetro o di metallo (fig. 188), i quali da una parte sono muniti di un tubetto conico (O) che si introduce in un orecchio, mentre si tura l'altro colla mano, e in posizione diametralmente opposta hanno una bocca (B) che si rivolge verso un centro sonoro.

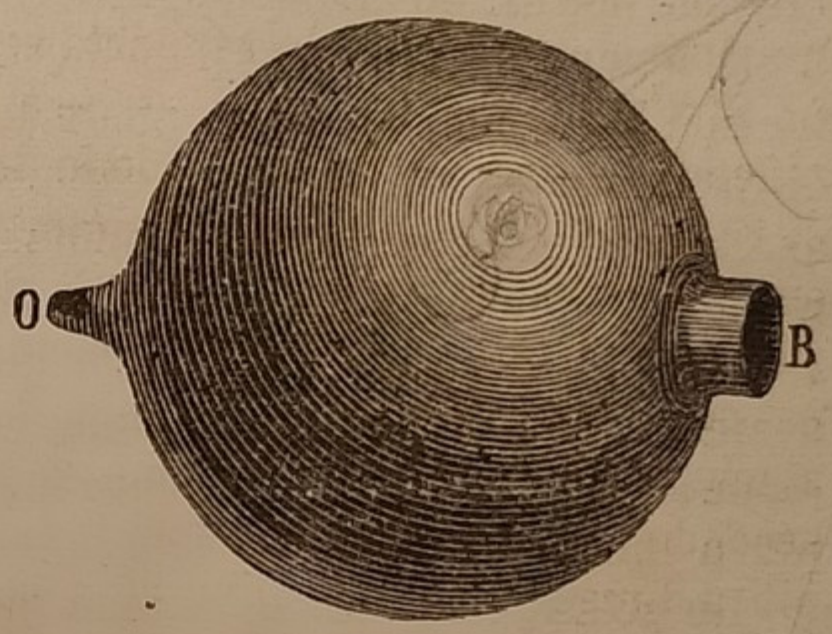


Fig. 188.

La massa d'aria racchiusa in tali risonatori, come la colonna aerea in un tubo chiuso ad un'estremità, viene posta in moto ondulatorio energico, solo quando per la bocca del risonatore entrano le onde di un determinato tono, corrispondente alle dimensioni del globo, che si dice il *tono proprio del risonatore.*

Perciò se si tura un orecchio e si applica all'altro un risuonatore si ode la maggior parte dei toni che si producono intorno assai meno che senza il risonatore; invece il tono proprio di questo si sente assai rinforzato.

Per es., se si fa suonare un tubo a linguetta il quale dà un forte tono ricco di armonici, od ipertoni, se fra questi vi è il tono proprio del risonatore lo si ode intensamente, mentre gli altri si sentono assai meno che senza il risonatore.

Il tono proprio del risonatore dipende dalle dimensioni del globo e della sua bocca. Una diminuzione di questa ha per effetto di abbassare quel tono.

Quindi, per l'uso dei risonatori conviene averne una serie di varia grandezza; i più grandi rinforzano i suoni gravi, i più piccoli gli acuti.

I risonatori con stretta bocca danno un considerevole rinforzo del tono, ma richieggono anche un più esatto accordo con quello che debbono rinforzare.

I risonatori sferici sono i migliori, ma si usano anche risonatori cilindrici o conici, che riescono più maneggevoli e di più facile costruzione.

L'orecchio provveduto di risonatore sente questo risonare non solo per la miscela di più toni, ma anche pei diversi rumori, come i passi di una persona che cammina, i colpi dati ad una parete, lo stridore di una sega o di una lima, ecc., perchè in questi suoni evvi facilmente quello del risonatore

§ 94. Suoni semplici e composti. Analisi e sintesi dei suoni.

1. Suoni semplici e composti. — *I suoni dati dai corpi sonori, in generale, non sono semplici, cioè costituiti da un solo numero di vibrazioni, ma risultano dalla mescolanza di parecchi toni.* Fra questi, il più grave, che ordinariamente è il più forte, dicesi *tono fondamentale,* ed è quello che porta il nome musicale del suono risultante, cioè ne determina la posizione nella scala; tutti gli altri toni semplici, più acuti, che accompagnano il fondamentale, si dicono *concomitanti* o *di accompagnamento*. Essi, nei toni propriamente detti, o suoni musicali, non sono che gli armonici 2, 3, 4, 5,... del tono fondamentale; invece nei rumori sono toni molto intensi, i cui numeri di vibrazioni non hanno alcun rapporto semplice con quello del tono fondamentale.

2. Prove sperimentali. — Se si fa suonare un corista, per es. un do_3, e tenendolo in mano pel suo piede lo si presenta alla bocca della sua cassa di risonanza, si ode il suono rinforzato perchè, come si è detto, la colonna aerea contenuta nella cassa può vibrare all'unisono. Ora, se lo stesso corista, al principio del suo moto vibratorio, viene presentato alla bocca della cassa di risonanza di un corista do_4, si ode anche un debole rinforzo; ma a misura che diminuisce l'ampiezza del moto vibratorio del corista, questo secondo rinforzo diviene sempre meno sensibile, mentre il primo si mantiene più a lungo.

Lo stesso risultato si ottiene presentando il corista alle colonne aeree contenute nei tubi a bocca.

Quindi si deve concludere che il tono di un corista al principio del suo moto vibratorio non è semplice, cioè costituito da un solo numero di vibrazioni, ma è accompagnato dal tono corrispondente ad un doppio numero di vibrazioni, cioè dall'armonico 2.

Se si tende sul sonometro una corda alquanto grossa e dopo averla scossa si tocca nel suo punto di mezzo con una barba di penna, determinando ivi un nodo, si spegne il tono fondamentale della corda, dovuto alla vibrazione di tutta la sua lunghezza, ma accostando l'orecchio si sente l'ottava acuta di quel tono, cioè l'armonico 2; parimenti toccandola ad $^1/_3$ della sua lunghezza si sente l'armonico 3, e così di seguito fino ad un certo limite.

Queste esperienze provano che col suono fondamentale della corda, dovuto alle vibrazioni di tutta la sua lunghezza, coesistono le vibrazioni delle sue parti aliquote, cioè delle sue due metà, le quali, per la legge delle lunghezze (pag. 303), danno l'ottava acuta; dei suoi terzi che danno l'armonico 3, ecc., perchè se queste vibrazioni non esistessero nella corda, certamente non si manifesterebbero toccandola.

Tali note armoniche, che accompagnano la nota fondamentale, sono meno sensibili di questa, perchè l'ampiezza delle vibrazioni delle parti aliquote è minore di quella della corda intiera.

Infine, si dimostra nel modo più generale che i suoni ordinari non sono semplici, ma composti, facendo *l'analisi acustica ed ottica dei suoni.*

3. L'analisi acustica dei suoni si fa mediante i risuonatori di Helmholtz. Per analizzare con questi un dato suono lo si mantiene per qualche tempo e si introducono successivamente nell'orecchio i diversi risonatori. Quando uno di questi rinforza notevolmente quel suono, si conclude che il tono proprio del risonatore fa parte di esso.

Ora, analizzando così i suoni dati dagli stromenti sonori si trova, in generale, che non solo risuona il risonatore che è accordato per quel tono, ma risuonano pure parecchi altri, e precisamente, se il suono è musicale risuonano quelli accordati per qualcuno degli armonici di quel tono.

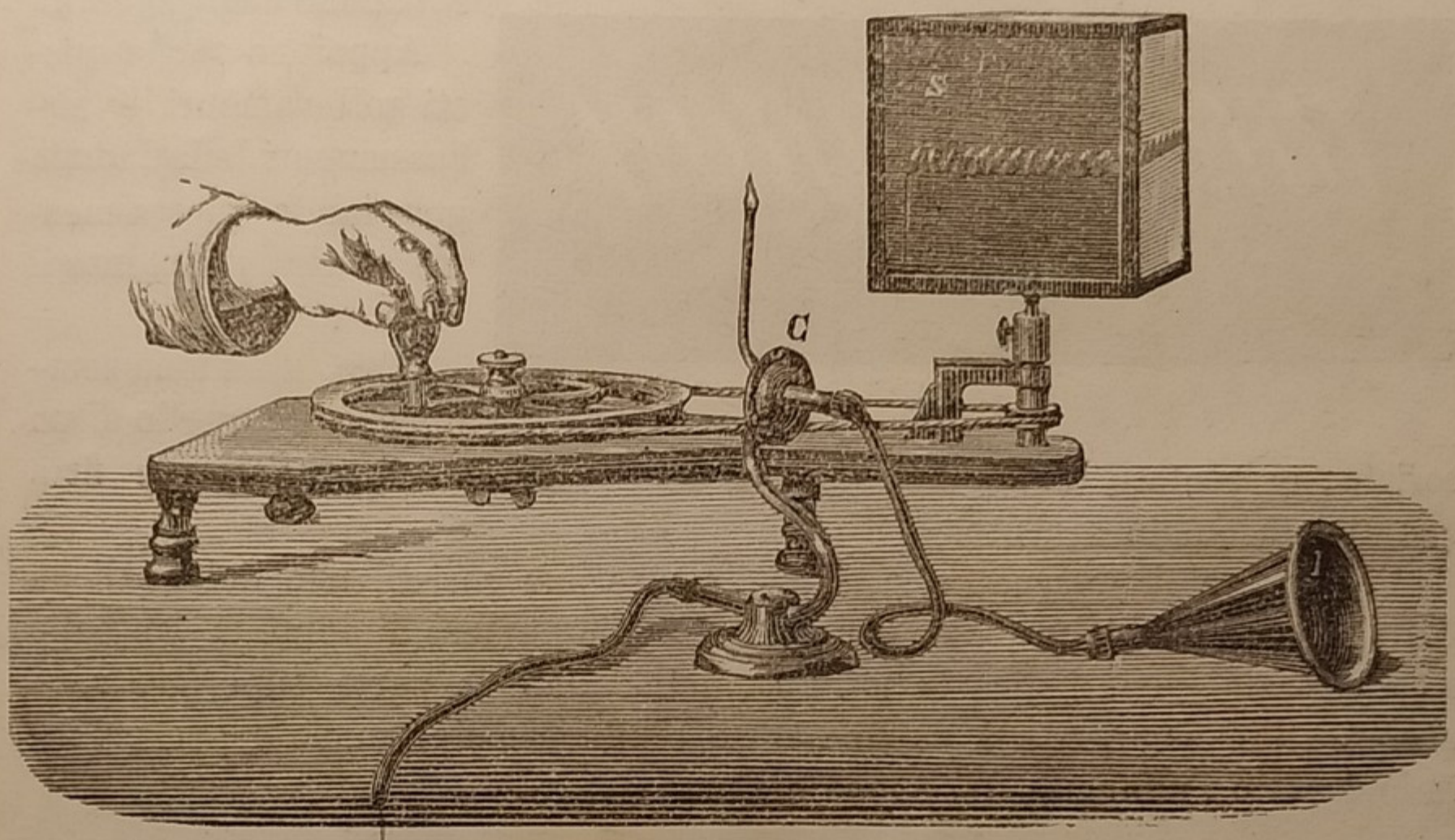


Fig. 189.

4. Modo di ottenere suoni semplici. — Quindi, *i suoni semplici si possono ottenere solo artificialmente;* per es., strofinando delicatamente con un archetto un diapason all'estremità di un rebbio, si trova, mediante i risonatori, che, massime verso la fine, il suono risultante è indecomponibile, cioè è un suono semplice.

Ma i toni semplici sono sordi, fiacchi e sgraditi.

5. Analisi ottica dei suoni. — L'analisi dei suoni si può anche eseguire coll'occhio osservando le immagini delle fiamme manometriche (pag. 314) in specchi rapidamente giranti, fissi alle 4 faccie di un cubo (S, fig. 189). Si applica alla capsula (C), dalla parte della medesima opposta a quella per cui arriva il gas sulla membranella, un tubo di gomma elastica terminato da un imbuto (I). Quando non si produce alcun suono la fiamma rimane in quiete e la sua immagine appare negli specchi giranti siccome un nastro luminoso continuo, di altezza eguale a quella della fiamma, perchè per la persistenza delle immagini sulla retina la si vede contemporaneamente in tutte le successive posizioni che essa prende per la rotazione degli specchi.

Invece, se arrivano nella capsula onde sonore, ciascuna di queste genera un'oscillazione della parete flessibile e quindi della fiamma; allora i succes-

sivi sollevamenti e le depressioni di quella appaiono negli specchi in luoghi diversi, cosicchè invece di un nastro luminoso continuo si vede una serie di immagini distinte e vicine l'una all'altra. Naturalmente le distanze delle singole immagini dipendono dalla celerità delle oscillazioni della fiamma e dalla celerità della rotazione degli specchi.

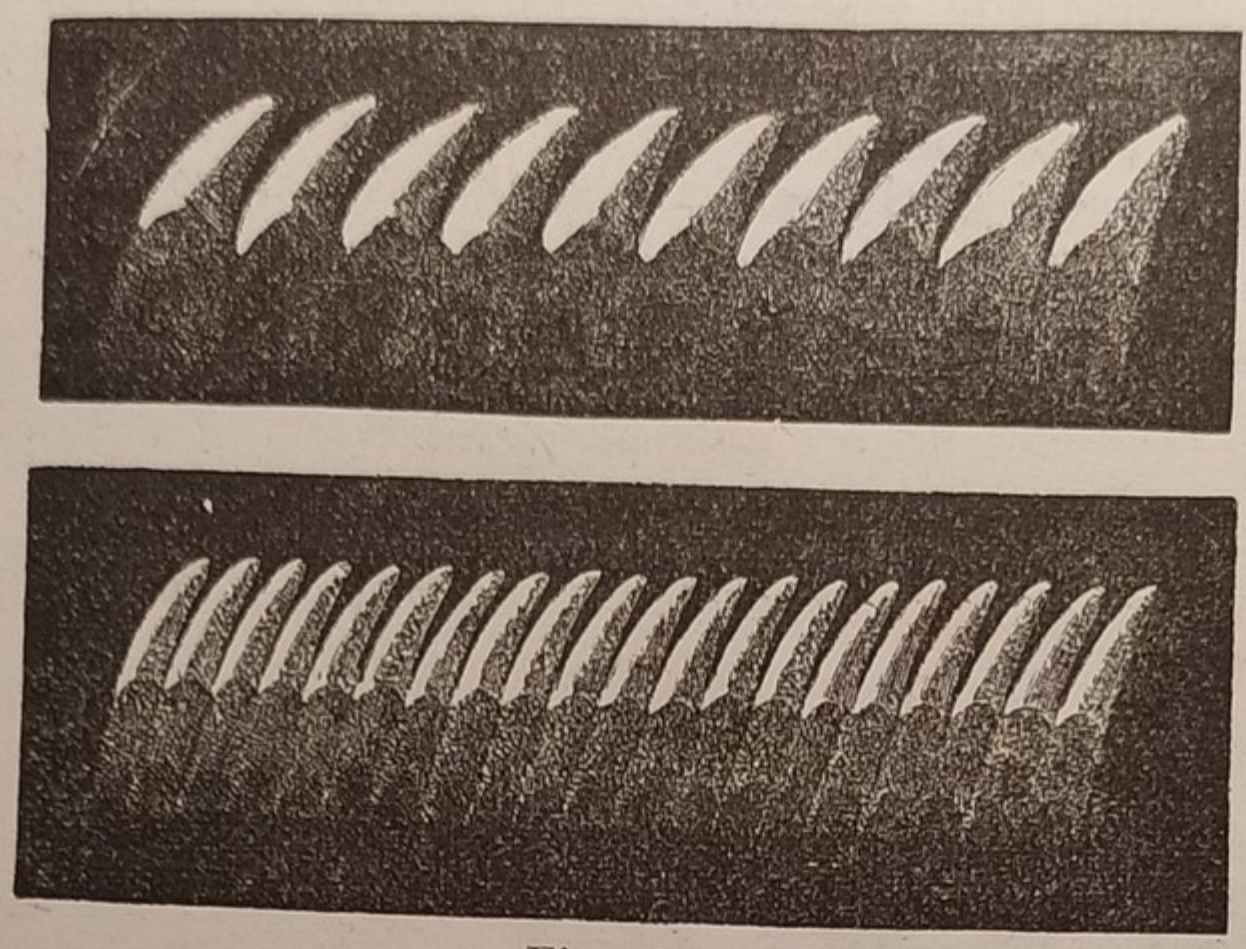


Fig. 190.

Appaiono anche questi sollevamenti e abbassamenti della fiamma guardando questa mentre si gira vivamente il capo.

Ora, un suono semplice, come quello di un corista, presentato all'imbuto, genera denti tutti eguali e tanto più fitti, quanto più quello è acuto.

Per es., se si presentano successivamente due coristi, uno dei quali dà l'ottava acuta dell'altro, esso genera un doppio numero di dentellature nello stesso spazio, come indica la fig. 190, nella quale la parte superiore rappresenta l'immagine della fiamma sotto l'influenza del suono grave e l'inferiore sotto l'influenza del suono acuto.

Se poi i due toni arrivano contemporaneamente nella capsula, risulta l'immagine della fig. 191, cioè la fiamma appare alternativamente sollevata ed abbassata. I denti alti corrispondono agli istanti in cui le semionde condensate dei dutoni coincidono e premono ambedue sulla membrana della capsula e quelli più bassi corrispondono agli istanti in cui solo le semionde condensate del tono più acuto premono la membrana.

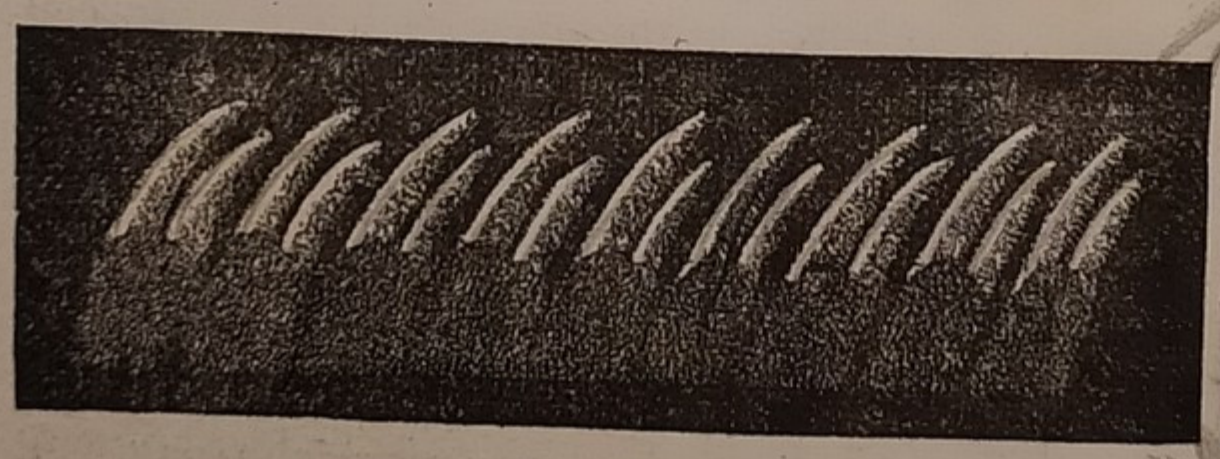


Fig. 191.

Un'immagine consimile risulta ogni qualvolta si manda nella capsula un suono composto di due toni, il cui intervallo è di ottava.

Se poi si mette il tubetto conico di un risonatore in comunicazione, mediante un tubo di gomma elastica, con una fiamma manometrica, come indica la fig. 189, supposto che all'imbuto (I) sia sostituito un risonatore, la presenza del tono proprio del risonatore si manifesta mediante allungamenti e accorciamenti alternati della fiamma, i quali si osservano cogli specchi giranti.

E se si hanno più capsule manometriche, ciascuna delle quali sia congiunta con un risonatore speciale invece dell'imbuto, allora si vede che ogni suono mette in oscillazione diverse fiamme, il che prova che ogni suono è composto di più toni.

§ 95. Tempera o metallo del suono.

1. Metallo del suono. — Si è già notato che nei suoni si distinguono tre qualità o caratteri, cioè: l'*altezza*, l'*intensità* e la *tempera* o *metallo*.

Si è già studiato la causa dei due primi caratteri; si tratta ora di conoscere la causa del terzo.

Dapprima: in che consiste tale carattere? In ciò che, per es., il *la* dato dalla seconda corda del violino si distingue dalla stessa nota data da un corista, da un flauto, da un'armonica, da una voce umana. Lo stesso dicasi per le altre note. *La qualità per la quale i suoni di diversi stromenti, o di diverse voci, quantunque abbiano eguale altezza e intensità, tuttavia si distinguono fra loro*, si dice *tempera* o *metallo* del suono.

2. Causa del metallo dei suoni. — La causa della tempera o metallo dei suoni venne scoperta da Helmholtz, il quale dimostrò che *il metallo del suono dipende dal diverso numero e dalla diversa intensità dei toni armonici che sempre accompagnano il tono fondamentale nei corpi sonori.*

3. Prove sperimentali. — *Questa proposizione si prova sperimentalmente* mediante l'analisi e la sintesi dei suoni.

Infatti coi risonatori si riconosce che i suoni dei diversi stromenti sonori contengono armonici diversi per altezza e intensità.

Lo stesso fatto si prova otticamente mettendo fiamme manometriche in comunicazione con diversi risuonatori capaci di rinforzare gli armonici di un dato tono fondamentale; allora, producendo la stessa nota con stromenti diversi, si veggono seghettate fiamme diverse, le quali sono messe in oscillazione dai risuonatori che rinforzano i diversi toni semplici componenti il suono risultante.

Inversamente si può fare la *sintesi dei suoni* e *comporne il metallo*, mediante la riunione dei toni elementari che li compongono. Così se un clarinetto manda una nota alquanto prolungata davanti un piano aperto, cogli smorzatori sollevati, le diverse corde che entrano in vibrazione per risonanza riproducono per sintesi quel suono.

La stessa esperienza si può fare colla voce umana.

Helmholtz costruì un apparecchio costituito da una serie di diapason, accordati secondo la serie armonica, trattenuti in vibrazione elettricamente, e muniti ciascuno di una cassa di risonanza che si può aprire più o meno mediante opportuno meccanismo in guisa da renderne il suono più o meno intenso. Ciascun diapason emettendo, con la conveniente intensità, uno dei suoni semplici svelati dall'analisi, il loro insieme riproduce effettivamente il suono composto che si vuole ottenere.

Si imita così benissimo il suono di qualunque stromento musicale, come pure della voce umana.

§ 96. Organo dell'udito.

1. Descrizione dell'orecchio umano. — L'orecchio umano consta di tre parti principali: l'*esterna*, la *media* e l'*interna*.

L'*orecchio esterno* è costituito dal *padiglione* o *conca* e dal *condotto uditivo* esterno (G, fig. 192), il quale è chiuso alla sua estremità dalla membrana del timpano (T). Il padiglione è un'espansione cartilaginea, la quale serve a concentrare le onde sonore verso il condotto uditivo. Però nell'uomo tale ufficio è assai limitato.

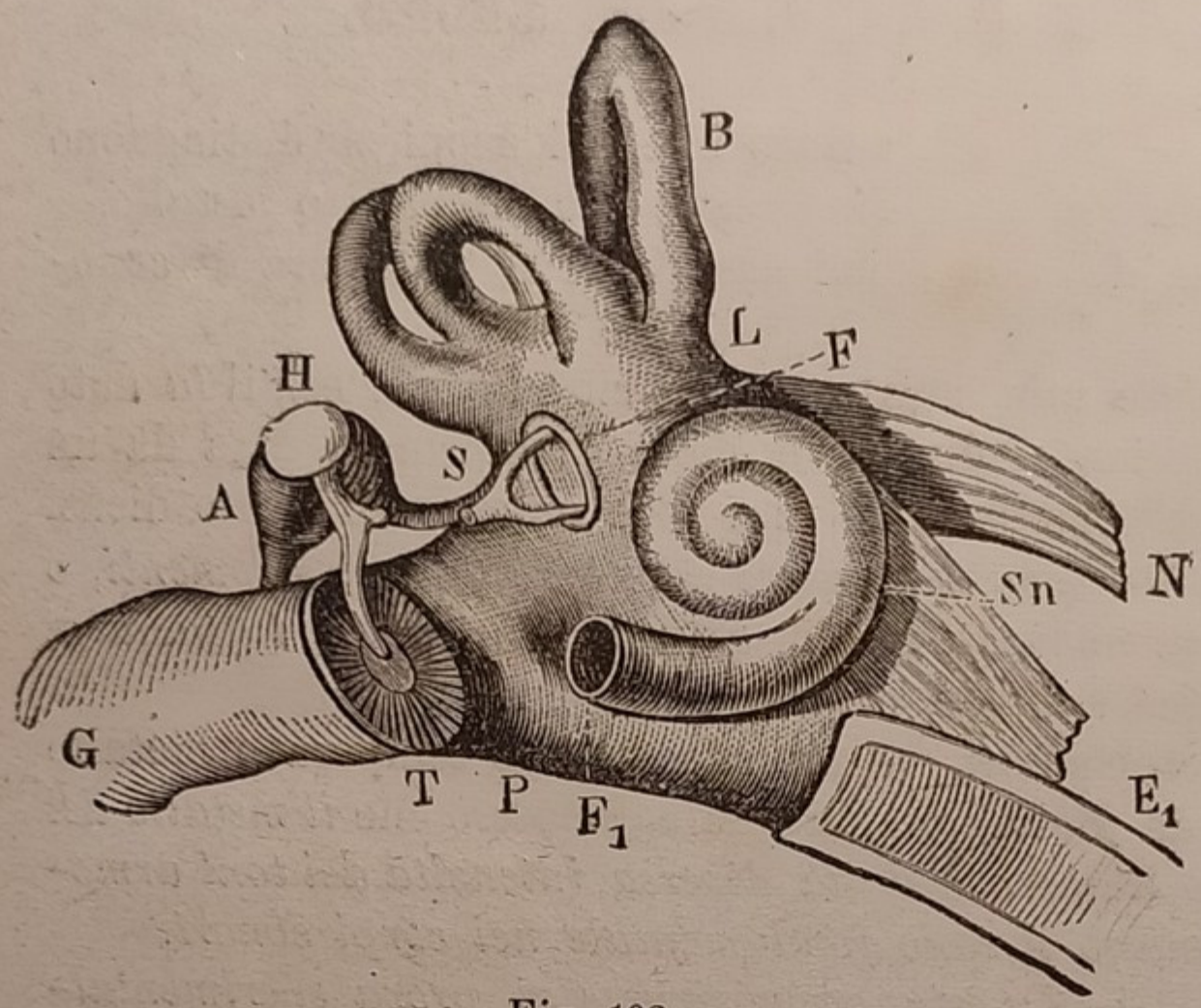


Fig. 192.

La *parte mediana* dell'orecchio, detta *cassa del timpano*, è una cavità piena d'aria, la quale comunica colla porzione nasale della faringe mercè un canale (E_1) detto *tromba* o *tubo d'Eustachio*, cosicchè la pressione dell'aria vi si mantiene eguale all'esterna. Essa è attraversata da una catena di 4 ossicini articolati fra loro, i quali, per la loro forma, si dicono: *martello*, *incudine*, *osso lenticolare* e *staffa*. Il manico del martello si addentra nella grossezza della membrana timpanica (T), mentre la sua testa si appoggia sull'incudine (A), la quale alla sua volta, mediante uno dei suoi rami e l'osso lenticolare (H), si congiunge colla staffa (S), la cui base è applicata ad un foro detto *finestra ovale* (F), praticato nella parete opposta alla membrana del timpano. Inferiormente alla finestra ovale esiste un altro foro detto *finestra rotonda* (F_1), chiuso da una membrana.

Orecchio interno. — Attraversando le finestre ovale e rotonda della parte media, si giunge nella parte interna e più importante dell'orecchio, detta *labirinto*, che è una cavità scavata nell'osso temporale. In essa si distinguono il *labirinto osseo* esterno e il *labirinto membranoso* interno, il quale si modella sul primo, ma con dimensioni alquanto minori. Il labirinto osseo contiene un liquido detto *perilinfa*, e quello membranoso è pure ripieno di un liquido detto *endolinfa*.

Nel labirinto si distinguono tre parti principali: una sovrastante, formata da tre canali (B), che dalla loro forma si dicono *semicircolari*; una sottostante, che per la sua forma dicesi *chiocciola* o *coclea* (S_n), e una intermedia detta *vestibolo*. Questo mette capo alla finestra ovale (F), e la chiocciola alla finestra rotonda (F_1).

Il nervo acustico (N) penetra nel labirinto osseo per un piccolo canale detto *condotto uditivo interno*, e quindi si divide in più rami che vanno alle diverse parti del labirinto membranoso.

La *chiocciola* o *coclea* è un tubo cilindrico avvolto a spirale per due giri e mezzo, e di meravigliosa struttura. Esso è percorso in tutta la sua lunghezza da due membrane, una delle quali detta *basiliare* è costituita da più di 6000 fibre parallele, di lunghezza crescente da 1 a 12, sulle quali si sollevano le così dette *arcate del Corti*, portanti cellule dette *uditive*, cui giungono i filamenti del ramo cocleare del nervo uditivo.

2. Percezione dei suoni. — Il padiglione dell'orecchio e il condotto uditivo concentrano le onde sonore sulla membrana del timpano, le cui vibrazioni sono trasmesse dai quattro ossicini all'orecchio interno, ove agitano il liquido del labirinto e quindi le pareti membranose che lo contengono, coi filamenti del nervo acustico che in quelle si distribuiscono.

Mediante appositi muscoli i quattro ossicini possono venire più o meno tesi fra la membrana del timpano e la finestra ovale, per modo che viene modificata la sensibilità dell'orecchio alle impressioni sonore.

Di più, secondo Helmholtz, ogni filamento della membrana basilare colla arcata del Corti che gli è applicata, è accordato per qualche nota, a guisa delle corde del pianoforte; perciò quando arriva uno scuotimento nel labirinto, oscillano, per risonanza, solo quei filamenti i quali sono capaci di vibrare all'unisono coi detti scuotimenti, in modo analogo a quello che succede nel pianoforte, quando, tenendo alzato il coperchio, vi si canta sopra una nota su l'una o l'altra vocale. Allora per risonanza entrano in vibrazione solo quelle corde che trovano nella nota il suono di cui sono suscettive, cosicchè il pianoforte a guisa di eco ripete quella nota (pag. 322).

Però ciascuna nota mentre scuote una fibra particolare colla massima intensità scuote pure alquanto le fibre vicine.

3. Potere risolutivo dell'orecchio. — L'orecchio ha la meravigliosa facoltà di distinguere un dato suono fra molti altri che vi arrivano contemporaneamente. Così in mezzo alla farraggine di suoni che si incrociano per l'aria in un teatro di musica quando suona l'orchestra noi possiamo benissimo distinguere la voce della prima donna, o lo scricchiolìo molesto delle scarpe di chi passa nel corridoio.

Tale attitudine dell'orecchio si dice *potere risolutivo*. Esso dipende dalla detta costituzione della chiocciola, per cui i diversi filamenti nervosi ricevono scuotimento da corpuscoli, ciascuno dei quali entra in vibrazione solo per un determinato tono.

§ 97. Interferenza delle onde sonore.

1. Effetto acustico dell'interferenza delle onde sonore. — Si è già notato che un moto ondulatorio sovrapponendosi ad un altro in opposta fase può produrre quiete (pag. 297). Ora, nel caso delle onde sonore la quiete costituisce mancanza del suono, o silenzio, e quindi deve verificarsi che *suono aggiunto a suono può produrre silenzio.*

2. Prova sperimentale. — Questo importante e sorprendente fatto si può provare sperimentalmente, nel modo più semplice, coll'apparecchio di Quinke, rappresentato dalla fig. 193.

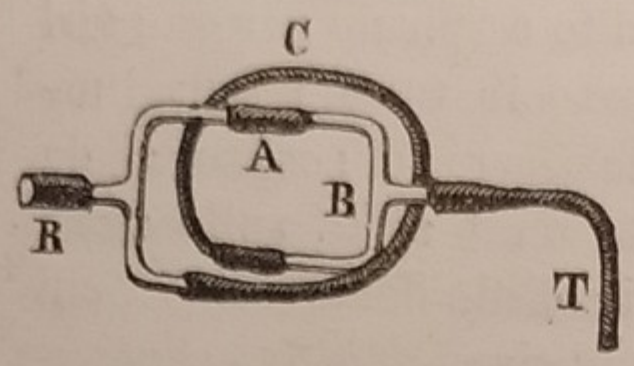


Fig. 193.

Consiste in due tubi di vetro o metallo, ciascuno dei quali si biforca in due rami, ma con distanza un poco diversa di questi. Tali rami si congiungono fra loro mediante 2 tubi di gomma: uno A corto, l'altro C più lungo del primo di $^1/_2$ lunghezza d'onda del tono con cui si sperimenta.

Per es., se si fa l'esperienza con un corista normale di 870 vibrazioni semplici per secondo, la lunghezza delle cui semionde è circa 39 *cm.*, il ramo C deve essere 39 *cm.* più lungo del ramo A.

Se si fa l'esperienza con un corista do_3 di 512 vibrazioni semplici per secondo, la lunghezza delle cui semionde è 66 *cm.*, i 2 rami debbono avere tale differenza di lunghezza.

Si fissa il corista avvitando il suo piede ad uno zoccolo di legno anzichè alla sua cassa armonica, e lo si colloca verticalmente in modo che l'estremità superiore dei suoi rebbi sia di fianco alla bocca dell'apparecchio fermato orizzontalmente su di una tavola. Indi con una mano si tiene la bocca del tubo T di gomma nell'orecchio, mentre coll'altra mano si tiene il tubo di gomma C, in modo da poterlo chiudere stringendolo colle dita, o lasciarlo aperto cessando di stringerlo.

Si dà al corista un piccolo scuotimento con un martello di sughero, e allora la persona che tiene nell'orecchio il tubo T sente il suono del corista quando stringe colla mano il tubo di gomma più lungo C, permodochè possano arrivare nell'orecchio solo le onde sonore che si propagano per il ramo più corto, ed invece non ode il suono del corista quando lascia aperto anche il tubo più lungo, permodochè arrivino contemporaneamente nell'orecchio le onde sonore che si propagano pei due rami.

E ciò perchè, supposto, per semplicità, che la lunghezza R A B del ramo più corto sia precisamente di una semionda, e quindi quella del ramo più ungo R C B sia di un'onda intiera, quando una semionda condensata arriva alla biforcazione si divide nei due rami. Ma in quello più lungo dell'altro di una semilunghezza d'onda, prima della semionda condensata vi è una semionda rarefatta proveniente da una precedente vibrazione del corista, e perciò nel punto in cui i due rami si riuniscono arrivano contemporaneamente una semionda condensata pel ramo corto ed una semionda rarefatta pel ramo lungo, nelle quali semionde i movimenti delle particelle sono eguali e contrarii, e perciò si annullano. Quindi coi due rami aperti si spegne il suono, mentre lo si ode quando uno dei rami è chiuso.

Però il fenomeno della sparizione del suono quando i due rami sono aperti è meno sensibile al principio del moto vibratorio del corista quando le sue vibrazioni sono più ampie, e diviene più sensibile a misura che si prolunga il detto moto e che le vibrazioni divengono meno ampie, perch-

al principio dello scuotimento nel suono del corista vi è anche l'armonico 2 cioè l'ottava acuta, la cui lunghezza d'onda è metà di quella del suono fondamentale, per spegnere la quale, la differenza di lunghezza dei due rami dovrebbe essere metà della precedente. In seguito il detto armonico si spegnè, e rimase solo il suono fondamentale per cui la differenza di lunghezza dei due rami è conveniente.

Il quale fatto dell'esistenza dell'armonico 2 al principio del suono del corista si può provare presentando questo successivamente ai 2 tubi sonori ut_3 e ut_4; si sente così che al principio anche il tubo ut_4 rinforza il suono del corista, e in seguito non più.

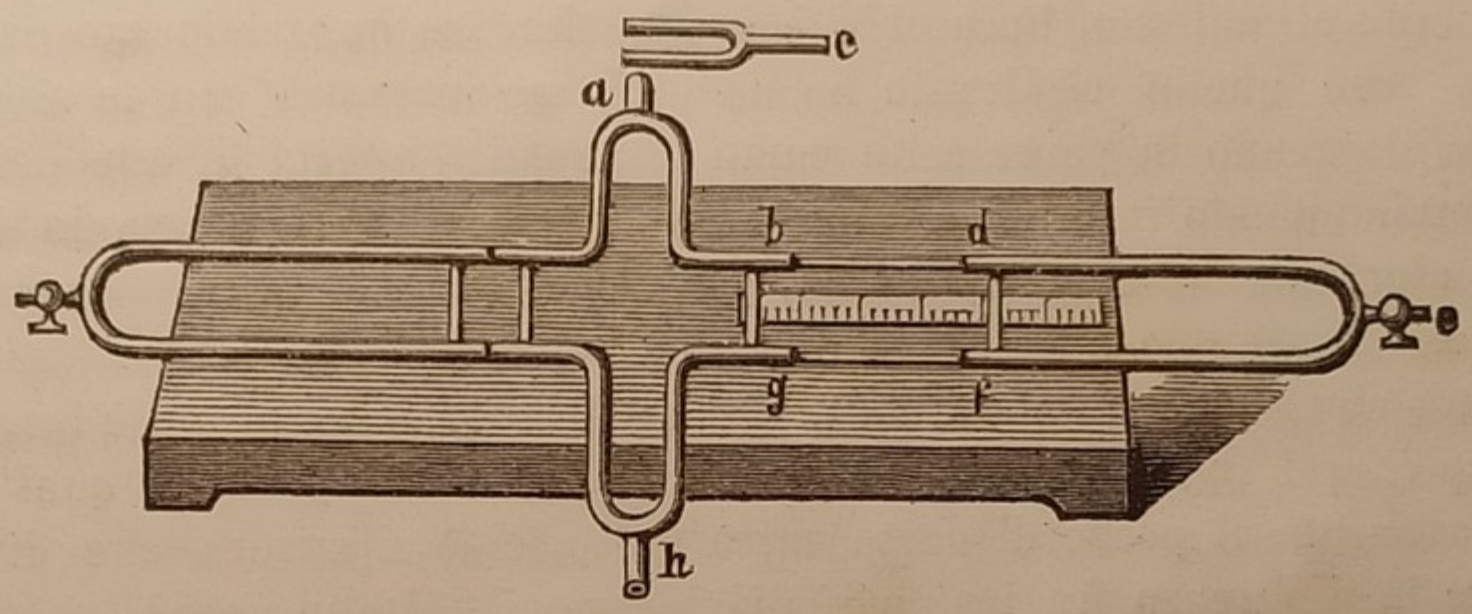


Fig. 194.

3. Prova ottica sperimentale dell'interferenza delle onde sonore. — Il precedente esperimento acustico si può ripetere coll'apparecchio rappresentato dalla fig. 194 costituito da due tubi metallici curvati ad U, uno dei quali *d e f* è scorrevole sui prolungamenti *b d*, *g f* dell'altro, a guisa di un trombone. Quando i due rami in cui si propaga il suono hanno eguale lunghezza, oppure una differenza di lunghezza eguale ad un numero intiero di lunghezze d'onda, i movimenti vibratorii che percorrono i due rami arrivano in *h* nella stessa fase e quindi si sommano, ed il suono si sente in *h*, ove si può applicare un tubo di gomma per condurlo all'orecchio. Ma se si allunga uno dei rami di $^1/_4$ della lunghezza dell'onda del tono che si propaga nei tubi, il che dà una differenza di cammino $^2/_4 = ^1/_2$ della lunghezza del l'onda, allora le onde arrivano in *h* in opposta fase, e quindi il suono si spegne.

Per rendere più sensibile il fenomeno si può applicare in *a* un risuonatore di Helmholtz, che risuoni col corista.

Ora, col precedente apparecchio si può manifestare all'occhio il fenomeno dell'interferenza delle onde sonore con una fiamma manometrica di cui si osserva l'immagine negli specchi giranti; perciò si mette il tubo *h* in comunicazione colla capsula manometrica, e si accende la fiammella del gas. Tappando il tubo *a* in modo che nei due rami non entrino affatto onde sonore, la fiammella non oscilla, e perciò negli specchi giranti si vede un nastro luminoso continuo; poscia si fanno entrare nei due rami di eguale lunghezza semionde condensate e rarefatte, e si osserva, mediante gli specchi, che la fiamma oscilla. Infine si stabilisce fra i due rami una differenza di $^1/_2$ lunghezza d'onda, e si osserva che le oscillazioni spariscono.

Per far entrare le onde sonore nei due rami del tubo di ottone si può avvicinare la cassa armonica del corista vibrante all'imboccatura *a*, oppure introdurre nel tubo *a* il tubetto conico di un risonatore, e accostare alla bocca di questo i rebbi del diapason vibrante.

Infine, per provare otticamente che il suono del corista non è semplice, ma in principio contiene l'armonico 2, si può osservare che nel caso in cui avviene l'interferenza non si ha tranquillità assoluta della fiamma, ma bensì in seguito, a misura che l'armonico 2 del corista si spegne col prolungarsi del suo moto vibratorio.

4. Esperienza dei battimenti. — Se si fanno suonare due tubi sonori aperti affatto all'unisono, l'orecchio è gradevolmente impressionato dai due suoni, perchè quello risultante ha un'uniforme intensità, ma se si altera l'unisono, coprendo in parte colla mano l'estremità aperta di uno dei tubi, ovvero inviluppando intorno a questo un pezzo di carta in modo da far variare alquanto la sua lunghezza, ovvero collocando la mano avanti la bocca, tosto si sentono alternative di rinforzi e diminuzioni nell'intensità dei due suoni, che si dicono *battimenti*. Questi divengono sempre più frequenti a misura che si copre vieppiù colla mano l'estremità aperta di quel tubo, o si fa avanzare il pezzo di carta verso l'alto, cioè a misura che diventa maggiore la differenza fra i numeri di vibrazioni dei due suoni.

Parimenti, se si hanno due diapason affatto all'unisono, fissati su casse di risonanza, basta gravare uno di essi con un poco di cera, per udire i battimenti, quando essi vengono posti in vibrazione, perchè col peso addizionale si altera l'unisono.

Invece di attaccare un pezzo di cera ad uno dei rebbi di un corista si può applicargli un anello corto di caucciù, il quale secondo la massa e la posizione sul rebbio ritarda più o meno le sue vibrazioni, e si trova facilmente una posizione dell'anello in cui i due coristi sono all'unisono. Allora un piccolo spostamento dell'anello altera l'accordo e genera dei battimenti.

In generale quando due suoni, di poco differente altezza, impressionano l'orecchio, questo ode alternative di aumento e diminuzione dell'intensità del suono, le quali chiamansi *battimenti*. Gli aumenti si dicono anche *rinforzi*, e le diminuzioni *pause*.

Il detto fenomeno nasce anche dall'interferenza delle onde sonore.

5. Fenomeno dei battimenti nelle campane. — Il fenomeno dei battimenti è frequentissimo nelle campane, perchè non è possibile fondere una grande campana in modo che essa presenti in tutti i suoi punti perfetta omogeneità, cioè densità ed elasticità perfettamente eguali. Essa si divide quindi facilmente in parti non perfettamente eguali, le quali vibrano un poco diversamente e generano battimenti.

6. Numero dei battimenti. — Il numero dei battimenti per secondo è eguale alla differenza dei numeri assoluti di vibrazioni di due toni.

7. Effetto dei battimenti. — Finchè i battimenti sono rari, per es., di 4, 8, 12 per secondo, si sentono distinti, e, per l'ondeggiamento che essi generano, danno al suono un carattere piacevolmente solenne e melanconico.

Nell'organo, l'effetto del registro detto *unda maris* riposa sui battimenti lenti. Ma quando il loro numero cresce, producono uno spiacevole stridore, la cui asprezza, secondo Helmholtz, diviene massima fra 30 e 40 per secondo.

Oltre questo numero i battimenti divengono meno aspri, e al di là di 132 per secondo cessano di essere percepiti, siccome impressioni distinte.

§ 98. Consonanze e dissonanze.

1. Fenomeno. — *Quando due o più suoni colpiscono contemporaneamente l'orecchio, se la loro sensazione è piacevole, si dice che fanno un accordo o consonanza od armonia; se invece danno una sensazione spiacevole, questa chiamasi: disaccordo o dissonanza.*

2. La causa delle dissonanze si attribuisce ai battimenti in numero spiacevole dei relativi toni.

3. — Nell'intervallo di un'ottava risultano i seguenti **accordi semplici:**

perfettamente consonanti:

$$\frac{\text{do}}{\text{do}} = \frac{1}{1}, \quad \frac{\text{do}_2}{\text{do}} = \frac{2}{1}, \quad \frac{\text{sol}}{\text{do}} = \frac{3}{2}, \quad \frac{\text{fa}}{\text{do}} = \frac{4}{3};$$

consonanti meno perfetti:

$$\frac{\text{la}}{\text{do}} = \frac{5}{3}, \quad \frac{\text{mi}}{\text{do}} = \frac{5}{4};$$

imperfettamente consonanti:

$$\frac{\text{sol}}{\text{mi}} = \frac{6}{5}, \quad \frac{\text{do}_2}{\text{mi}} = \frac{8}{5};$$

dissonanti:

$$\frac{\text{re}}{\text{do}} = \frac{9}{8}, \quad \frac{\text{mi}}{\text{re}} = \frac{10}{9}, \quad \frac{\text{la}}{\text{sol}} = \frac{10}{9}.$$

Il che si può provare mediante tubi sonori applicati al mantice.

4. — Oltre gli accordi ora notati, detti *semplici*, si hanno gli **accordi multipli** o **composti,** cioè risultanti dalla sovrapposizione di più di due toni. I più piacevoli accordi multipli sono l'*accordo perfetto maggiore* (do, mi, sol, do_2, i cui numeri relativi divisi stanno fra loro come 4 : 5 : 6 : 8) e l'*accordo perfetto minore* (la, do_2, mi_2, la_2, 10 : 12 : 15 : 20).

§ 99. Il fonografo.

Il fonografo di Edison (*) serve a scrivere e riprodurre i suoni. Esso è costituito da un cilindro avente una scanalatura di passo uguale a quello della vite praticata sul suo asse di rotazione; siccome il cilindro viene fatto avanzare lungo l'asse, un

---

(*) Questa descrizione è tolta dal *Trattato elementare di Fisica* di Oreste Murani. Ulrico Hoepli, 1901. Volume I, pag. 403-405.

punto della sua superficie descrive così l'elica tracciatavi. Il cilindro viene ricoperto di stagnola in modo che sulla faccia esterna si disegni il rilievo della scanalatura. Volendo far funzionare l'apparecchio si dispone lateralmente al cilindro un tamburello, costituito da una imboccatura in fondo alla quale è tesa una sottilissima lamina elastica che comunica le sue vibrazioni ad una puntina sostenuta da una molla opportuna, fissandolo in tale posizione che la punta prema leggermente sulla stagnola nel mezzo della scanalatura, presso l'estremità del cilindro più lontana dalla manovella occorrente ad imprimere la rotazione. Rotando regolarmente il cilindro, la punta traccia un solco tutto uguale secondo la mediana della scanalatura elicoidale; ma se intanto si produce un suono in vicinanza, allora la lamina elastica, entrando in vibrazione, comunica il suo moto alla punta che in tal modo scava nella stagnola non più un solco uniforme, ma un solco più o meno profondo a seconda dell'ampiezza delle vibrazioni ossia dell'intensità del suono, e con discontinuità più o meno frequenti a seconda della maggiore o minore altezza del suono.

Staccato poi il tamburello dal cilindro, lo si fissa da capo nella primitiva posizione rispetto al cilindro, che si torna a far ruotare colla velocità uniforme antecedente. La punta guidata dal solco rifà allora tutti i movimenti di prima comunicandoli alla membrana, la quale, ripetendo esattamente il moto vibratorio eseguito sotto l'azione delle onde sonore, riproduce fedelmente i suoni. Siccome le stagnole, a forza di ripetere i suoni, finiscono per sciuparsi, così oggidì vengono ad esse sostituiti dei cilindri vuoti, di cera particolare, chiamati *fonogrammi*, che si infilano sul cilindro metallico, non più munito di scanalature e ridotto leggermente conico; inoltre il movimento viene impresso, per maggiore regolarità, da un motorino elettrico.

INDICE

Prefazione alla prima edizione . . . . . *Pag.* IIB
Prefazione alla terza edizione . . . . . » IV

Capitolo I.

NOZIONI PRELIMINARI.

§ 1. Corpi, materia, fenomeni, osservazioni ed esperimenti . *Pag.* 1
§ 2. L'estensione e l'impenetrabilità . . . . . » 3
§ 3. La divisibilità, gli atomi, le molecole e l'etere . . . . » 4
§ 4. I tre stati di aggregazione dei corpi . . . . . » 7
§ 5. La compressibilità . . . . . » 8
§ 6. La coesione e l'adesione . . . . . » 8
§ 7. La dilatabilità . . . . . » 9
§ 8. Il Termometro . . . . . » 12
§ 9. La porosità . . . . . » 17

Capitolo II.

NOZIONI DI MECCANICA GENERALE.

§ 10. Moto rettilineo e curvilineo, uniforme e vario. . . . *Pag.* 19
§ 11. Formole e leggi del moto uniforme . . . . . » 23
§ 12. L'inerzia . . . . . » 24
§ 13. Forze e loro classificazione . . . . . » 26
§ 14. Massa, volume e densità . . . . . » 29
§ 15. La gravità e il peso dei corpi . . . . . » 31
§ 16. Rappresentazione grafica delle forze . . . . . » 34
§ 17. Composizione e scomposizione delle forze . . . . . » 37
§ 18. Risultante di due o più forze aventi la stessa linea di azione » 39
§ 19. Risultante di due o più forze concorrenti . . . . . » 40
§ 20. Risultante di due o più forze parallele e cospiranti . . . » 48
§ 21. Risultante di due o più forze parallele e contrarie . . . » 52
§ 22. Momenti di rotazione . . . . . » 54

§ 23. Il centro di gravità . . . . . *Pag.* 58
§ 24. Equilibrio dei corpi sotto l'azione della gravità . . . . » 61
§ 25. Leggi della caduta dei gravi . . . . . » 67
§ 26. Ascesa verticale dei gravi . . . . . » 75
§ 27. Moto uniformemente vario. . . . . » 79
§ 28. Composizione e scomposizione dei movimenti . . . . . » 80
§ 29. Misura dinamica delle forze . . . . . » 89
§ 30. Il pendolo. . . . . » 94
§ 31. Azione e reazione . . . . . » 104
§ 32. La forza centrifuga . . . . . » 105
§ 33. Il lavoro meccanico . . . . . » 112
§ 34. Forza viva di una massa in moto . . . . . » 118
§ 35. Energia cinetica e potenziale - Conservazione della energia » 121
§ 36. La leva . . . . . » 122
§ 37. La carrucola . . . . . » 128
§ 38. La ruota nel cilindro . . . . . » 131
§ 39. Il piano inclinato . . . . . » 132
§ 40. La vite . . . . . » 137
§ 41. Il cuneo . . . . . » 139
§ 42. Le resistenze passive . . . . . » 140
§ 43. La bilancia e la stadera . . . . . » 144
§ 44. Proprietà meccaniche speciali dei solidi . . . . . » 148

Capitolo III.

MECCANICA SPECIALE DEI LIQUIDI.

§ 45. Coesione, compressibilità ed elasticità dei liquidi. . . *Pag.* 154
§ 46. Il principio di Pascal e il torchio idraulico . . . . . » 157
§ 47. Forma della superficie libera dei liquidi . . . . . » 160
§ 48. Pressioni verticali dall'alto in basso dovute alla gravità nei liquidi . . . . . » 162
§ 49. Pressioni dei liquidi sulle pareti laterali dei recipienti . . » 166
§ 50. Equilibrio di un liquido contenuto in vasi comunicanti . . » 169
§ 51. Equilibrio dei liquidi eterogenei nei vasi comunicanti . . » 172
§ 52. Pressione verticale dei liquidi dal basso in alto . . . . . » 173
§ 53. Il principio d'Archimede . . . . . » 174
§ 54. Equilibrio dei corpi immersi nei liquidi . . . . . » 176
§ 55. Equilibrio dei fluidi non suscettibili di mescolarsi, contenuti in uno stesso recipiente. . . . . » 181
§ 56. Determinazione del peso specifico . . . . . » 183

§ 57. Areometri, volumetri, densimetri e alcoolometro centesimale *Pag.* 188
§ 58. Adesione fra i solidi e i liquidi . . . . . » 191
§ 59. Diffusione, diosmosi e dialisi dei liquidi . . . . . » 192
§ 60. Forma della superficie libera dei liquidi in vicinanza delle pareti dei recipienti . . . . . » 196
§ 61. Contrattilità delle lamine liquide curve . . . . . » 197
§ 62. Sollevamento o depressione dei liquidi negli spazi capillari » 198

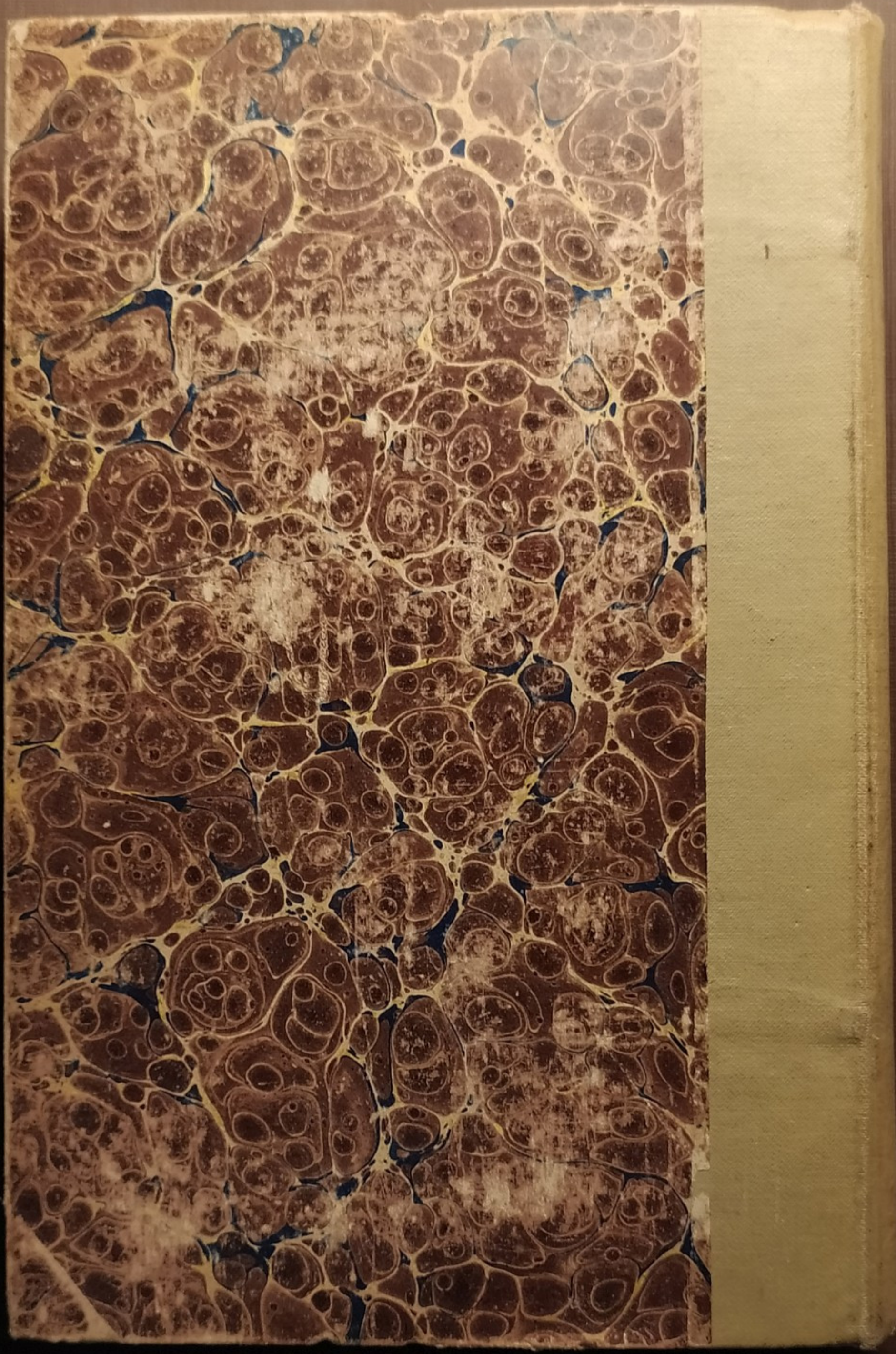
Capitolo IV.

MECCANICA SPECIALE DEGLI AERIFORMI.

§ 63. Caratteri e costituzione dei gas . . . . . *Pag.* 201
§ 64. Trasmissione delle pressioni nei gas . . . . . » 202
§ 65. Il peso dei gas e la pressione atmosferica . . . . . » 203
§ 66. Valore della pressione atmosferica . . . . . » 208
§ 67. Barometri . . . . . » 212
§ 68. Legge di Boyle o di Mariotte . . . . . » 222
§ 69. Manometri . . . . . » 226
§ 70. Il principio di Archimede nei gas e gli aerostati . . . . » 228
§ 71. La macchina pneumatica . . . . . » 231
§ 72. Pompa di condensazione e di rarefazione dei gas . . . » 237
§ 73. Le pompe idrauliche . . . . . » 240
§ 74. I sifoni . . . . . » 243
§ 75. Adesione dei gas ai solidi e ai liquidi . . . . . » 246
§ 76. Diffusione e diosmosi dei gas . . . . . » 248

Capitolo V.

NOZIONI DI ACUSTICA.

§ 77. Moto vibratorio dei corpi elastici . . . . . *Pag.* 253
§ 78. Causa del suono . . . . . » 255
§ 79. Propagazione del suono . . . . . » 256
§ 80. Velocità del suono . . . . . » 258
§ 81. Onde e raggi sonori . . . . . » 260
§ 82. Riflessione del suono . . . . . » 267
§ 83. L'eco . . . . . » 272
§ 84. Intensità del suono . . . . . » 275

§ 85. Altezza dei suoni . . . . . *Pag.* 279
§ 86. Scala musicale e suoni armonici . . . . . » 257
§ 87. Diesis e bemolli . . . . . » 292
§ 88. Scala naturale e temperata . . . . . » 294
§ 89. Interferenza delle onde. . . . . » 296
§ 90. Vibrazioni trasversali delle corde . . . . . » 301
§ 91. Vibrazioni trasversali delle verghe e delle piastre . . . » 307
§ 92. Tubi sonori . . . . . » 309
§ 93. Risonanza. . . . . » 322
§ 94. Suoni semplici e composti – Analisi e sintesi dei suoni. . » 326
§ 95. Tempera o metallo del suono. . . . . » 329
§ 96. Organo dell'udito . . . . . » 330
§ 97. Interferenza delle onde sonore . . . . . » 331
§ 98. Consonanze e dissonanze . . . . . » 335
§ 99. Il fonografo . . . . . » 335